

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU



Usporedba kvalitete rezanja aluminija plazmom i laserom

Završni rad

Josip Mioč

ZAGREB, 2009.

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU



Usporedba kvalitete rezanja aluminija plazmom i laserom

Završni rad

Voditelj rada:

Doc. dr. sc. Branko Bauer

Josip Mioč

ZAGREB, 2009.

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno, koristeći se znanjem stečenim na fakultetu, kao i navedenom literaturom.

ZAHVALA

Ovaj rad je izrađen pod stručnim vodstvom doc. dr. sc. Branka Bauera. Ovim putem mu se srdačno zahvaljujem na pruženoj podršci i korisnim savjetima tijekom izradbe ovog rada, kao i na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Također se zahvaljujem djelatnicima firme Pro d.o.o. koji su mi pomogli pri izradi eksperimentalnog dijela završnog rada.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Damiru Ciglaru, dipl. ing. Marku Katiću i dipl.ing. Vedranu Šimunoviću na ukazanoj suradnji i pomoći pri izradi ovog rada.

Najveću zahvalu dugujem svojim roditeljima na velikoj potpori i strpljenju prilikom mog cijelog školovanja, a posebno tijekom ovog preddiplomskog studija.

SAŽETAK

U ovom radu obrađena je usporedba kvalitete rezanja aluminija plazmom i laserom. U uvodnom dijelu opisani su postupci rezanja plazmom i laserom, njihove varijante te prednosti i nedostaci pojedinih postupaka rezanja. Navedeni su i osnovni parametri i principi rezanja plazmom i laserom, te njihov utjecaj na kvalitetu reza. Isto tako, u uvodu je objašnjena i norma HRN EN ISO 9013 prema kojoj se određuje kvaliteta reza.

Eksperimentalni dio izveden je u Laboratoriju za zavarene konstrukcije te u firmi Pro d.o.o. S pomoću strojne plazme SPARCIN 900M i CO₂ lasera TRUMPF 3020 rezan je aluminijski lim (Al 99,7) debljine 3 mm. Uzorci su rezani s različitim brzinama. Raspon brzina kod plazme iznosio je od 1 m/min do 5 m/min (s korakom 0,5 m/min), dok je raspon brzina kod lasera iznosio od 0,7 m/min do 6,3 m/min (s korakom 0,7 m/min). Promatran je utjecaj promjene brzine na kvalitetu reza. Nakon rezanja, u Laboratoriju za alatne strojeve i Laboratoriju za precizna mjerenja dužina izvršena su mjerenja pojedinih značajki kvalitete reza te svrstavanje u pojedine klase kvalitete reza. Na prijenosnom uređaju za mjerenje hrapavosti Mitutoyo – SJ 201 mjerena je hrapavost površine, dok je tolerancija okomitosti ili kutnosti te širina reza mjerena na alatnom mikroskopu. Veličine hrapavosti Rz – prosječne visine neravnina te vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti klasificirane su prema normi HRN EN ISO 9013.

Dobivene su jako dobre klase kvalitete reza i plazmom i laserom. Uzorci izrezani plazmom uglavnom postižu drugu klasu hrapavosti i tolerancije okomitosti ili kutnosti, dok uzorci izrezani laserom postižu prvu klasu kvalitete reza. Promjena brzine rezanja pokazala se kao utjecajni čimbenik na kvalitetu reza. Utvrđena je optimalna brzina rezanja od 3,5 m/min, i za plazmu i za laser te je tom brzinom dobivena najbolja kvaliteta reza.

Sadržaj:

POPIS SLIKA	2
POPIS TABLICA.....	3
POPIS OZNAKA	4
1. Uvod	5
1.1. Plazma rezanje.....	5
1.1.1. Postupci rezanja plazmom.....	7
1.1.1.1. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija (standardna plazma)	7
1.1.1.2. Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem (rotirajući plin).....	8
1.1.1.3. Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka.....	9
1.1.2. Parametri procesa.....	11
1.2. Lasersko rezanje.....	13
1.2.1. Vrste lasera	14
1.2.2. Varijante rezanja laserom.....	15
1.2.3. Parametri procesa.....	16
1.3. Toplinsko rezanje – Razredba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće (ISO 9013:2002; EN ISO 9013:2002)	18
1.3.1. Područje primjene	18
1.3.2. Izrazi i definicije objašnjeni slikama	18
1.3.3. Određivanje kvalitete reznih površina	24
1.3.4. Kvaliteta površine reza	28
1.3.4.1. Karakteristične vrijednosti.....	28
1.3.4.2. Rasponi mjerenja.....	28
1.3.4.3. Tolerancija okomitosti ili kutnosti.....	29
1.3.4.4. Prosječna visina neravnina, Rz5	29
1.3.5. Dimenzionalne tolerancije	30
1.3.5.1. Općenito	30
1.3.5.2. Dimenzionalne tolerancije na dijelovima bez završne obrade.....	32
1.3.5.3. Dimenzionalne tolerancije dijela s završnom obradom.....	32
1.3.5.4. Dodatak za završnu obradu.....	33
1.3.6. Informacije u tehničkoj dokumentaciji	34
1.3.6.1. Oznake veličina	34
1.3.7. Oznake kvalitete površine reza i klase tolerancija	34
1.3.7.1. Oznake na tehničkim crtežima.....	34
2. Eksperimentalni rad	35
2.3. Određivanje kvalitete reza – plazma	38
2.3.1. Mjerenje hrapavosti površine.....	40
2.3.2. Mjerenje tolerancija kutnosti ili okomitosti	44
2.3.3. Mjerenje širine reza.....	47
2.4. Određivanje kvalitete reza – laser	50
2.4.1. Mjerenje hrapavosti površine.....	52
2.4.2. Mjerenje tolerancija okomitosti ili kutnosti	55
2.4.3. Mjerenje širine reza.....	57
2.5 Usporedba izgleda i kvalitete rezova plazmom i laserom za optimalne parametre.....	58
2.6. Usporedba cijene i kvalitete rezanja.....	60
3. Zaključak.....	62
4. Literatura	64

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Preneseni i nepreneseni luk kod plazma rezanja	6
Slika 1.2 Standardni postupak plazma rezanja	7
Slika 1.3 Plazma rezanje sa sekundarnim medijem	8
Slika 1.4 Plazma rezanje sa sekundarnim plinom u vodi	8
Slika 1.5 Precizno plazma rezanje	9
Slika 1.6 Dijagram brzine rezanja u ovisnosti o debljini materijala	12
Slika 1.7 Shema rezanja laserom	14
Slika 1.8 Valne duljine industrijskih lasera	14
Slika 1.9 Usporedba leća žarišnih duljina f od 2,5 i 5 inča (63,5 i 127 mm)	17
Slika 1.10 Proces rezanja radnog komada s odgovarajućim izrazima	19
Slika 1.11 Gotovi radni komad s odgovarajućim izrazima	20
Slika 1.12 Tipovi pravocrtnog reza	20
Slika 1.13 Tipovi konturnog reza	21
Slika 1.14 Rezna linija	21
Slika 1.15 Tolerancija okomitosti ili kutnosti (vertikalni rez)	22
Slika 1.16 Prosječna visina neravnina	23
Slika 1.17 Taljivi gornji rub	23
Slika 1.18 Oblici i položaji tolerancija prikazani na izrezanome limu	24
Slika 1.19 Definicija raspona mjerenja za tolerancije okomitosti ili kutnosti	27
Slika 1.20 Tolerancije okomitosti ili kutnosti, u – debljine radnog komada do 30 mm	29
Slika 1.21 Prosječna visina neravnina, Rz5 – debljine radnog komada do 150 mm	30
Slika 1.22 Dimenzionalne tolerancije dijela bez završne obrade	32
Slika 1.23 Dimenzionalne tolerancije dijela s završnom obradom	33
Slika 2.1 Prikaz upravljačke jedinice i CNC stola za plazma rezanje	35
Slika 2.2 Sustav za rezanje laserom	36
Slika 2.3 Prijenosni uređaj Mitutoyo SJ – 201 za mjerenje hrapavosti	41
Slika 2.4 Prikaz ovisnosti srednjeg iznos hrapavosti o brzini rezanja	43
Slika 2.5 Prikaz ovisnosti maksimalne visine profila o brzini rezanja	43
Slika 2.6 Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja	44
Slika 2.7 Prikaz ovisnosti odstupanja srednjeg korijena profila o brzini rezanja	44
Slika 2.8 Kvalitativni prikaz udaljenosti mjernih površina	45
Slika 2.9 Mjerenje dimenzija a i b na alatnom mikroskopu	45

Slika 2.10 Prikaz ovisnosti tolerancija okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja	46
Slika 2.11 Izrezani plazma ispitni uzorak za mjerenje širine reza	47
Slika 2.12 Alatni mikroskop LFSB – a i plazma izrezani ispitni uzorak	48
Slika 2.13 Kvalitativni prikaz širina reza	48
Slika 2.14 Prikaz ovisnosti širine reza o brzini rezanja	49
Slika 2.15 Prikaz razlika širina reza u ovisnosti o brzini rezanja	49
Slika 2.16 Prikaz mjerenja hrapavosti laserskih uzoraka	52
Slika 2.17 Prikaz ovisnosti srednjeg iznosa hrapavosti o brzini rezanja	54
Slika 2.18 Prikaz ovisnosti maksimalne visine profila o brzini rezanja	54
Slika 2.19 Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja	55
Slika 2.20 Prikaz ovisnosti odstupanja srednjeg korijena profila o brzini rezanja	55
Slika 2.21 Prikaz ovisnosti tolerancija okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja	56
Slika 2.22 Prikaz laserskog ispitnog uzorka i alatnog mikroskopa za mjerenje širine reza	57
Slika 2.23 Prikaz ovisnosti širine reza o brzini rezanja	58
Slika 2.24 Prikaz razlika širina reza u ovisnosti o brzini rezanja	58
Slika 2.25 Dijagram analize plazma, plinskog i laserskog rezanja s obzirom na produktivnosti i debljinu materijala	60

POPIS TABLICA

Tablica 1.1 Kombinacije plinova kod rezanja plazmom	13
Tablica 1.2 Usporedba CO ₂ i ND:YAG lasera	15
Tablica 1.3 Mogućnost rezanja različitih materijala CO ₂ laserom snage 1 kW	17
Tablica 1.4 Točnost mjernih instrumenata	25
Tablica 1.5 Hrapavost mjernih instrumenata	25
Tablica 1.6 Dimenzije f_a	27
Tablica 1.7 Rasponi tolerancija okomitosti ili kutnosti, u	29
Tablica 1.8 Rasponi prosječnih visina neravnina, Rz5	29
Tablica 1.9 Granična odstupanja za nominalne dimenzionalne tolerancije – klasa 1	31
Tablica 1.10 Granična odstupanja za nominalne dimenzionalne tolerancije – klasa 2	31
Tablica 1.11 Dodatak za završnu obradu	33
Tablica 2.1 Tehnički podaci plazme SPARCIN 900M	36
Tablica 2.2 Tehnički podaci lasera TRUMPF 3020	37
Tablica 2.3 Kemijski sastav Al 99, 7	37

Tablica 2.4 Parametri rezanja aluminija plazmom	38
Tablica 2.5 Izgled reza kod plazme u ovisnosti o brzini rezanja	39
Tablica 2.6 Izmjerene vrijednosti hrapavosti plazma uzoraka	42
Tablica 2.7 Dobivene vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti plazma uzoraka	46
Tablica 2.8 Dobivene vrijednosti širine reza plazma uzoraka	49
Tablica 2.9 Izgled reza kod lasera u ovisnosti o brzini rezanja.....	51
Tablica 2.10 Izmjerene vrijednosti hrapavosti laserskih uzoraka	53
Tablica 2.11 Dobivene vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti laserskih uzoraka	56
Tablica 2.12 Dobivene vrijednosti širine reza laserskih uzoraka	57
Tablica 2.13 Usporedba kvalitete reza plazme i lasera	59
Tablica 2.14 Ocjena tehnologije rezanja u odnosu na kvalitetu, produktivnosti i efikasnost rezanja	61

POPIS OZNAKA

Oznaka	Veličina	Jedinica
z	položaj žarišta snopa	mm
λ	valna duljina svjetlosti	nm
P	snaga lasera	W
v	brzina rezanja	m/min
f	žarišna duljina leće	mm
a	debljina radnog komada	mm
b	udaljenost sapnice od radnog komada	mm
e	duljina reza	mm
Z_t	visina profila	mm
l_n	duljina vrednovanja	mm
l_r	pojedinačna duljina uzorka profila hrapavosti	mm
ϕ	promjer sapnice	mm
A	struja rezanja	A
Rz_5	prosječna visina neravnina	μm
Ra	aritmetički srednji iznos hrapavosti	μm
Ry	maksimalna visina profila	μm
Rq	odstupanje srednjeg korjena profila	μm

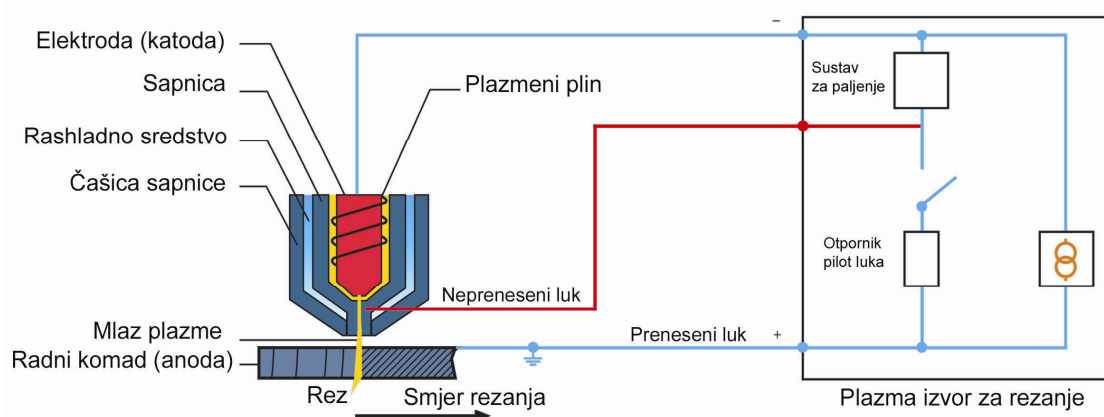
1. Uvod

Za metalnu industriju postupak rezanja je prvi u tehnološkom slijedu operacija izrade neke konstrukcije zbog čega je potrebno pažljivo odabrati tehnologiju rada i osigurati da se proizvodnja odvija bez prekida i u predviđenom vremenskom roku. Također, tehnologija rezanja treba biti takva da proizvod nakon rezanja bude spreman za slijedeću tehnološku operaciju (npr. zavarivanje), odnosno bez potrebe naknadne obrade reza (čist rez, sa što manje deformacija), što u protivnom iziskuje dodatne troškove i povisuje cijenu proizvodnje. Zato je odabir odgovarajućeg postupka rezanja od odlučujuće važnosti za upravljanje troškovima. Sva veća internacionalizacija tržišta i pojačani natjecateljski pritisak konkurencije, zahtijevaju porast ekonomičnosti proizvodnje u pogonima i postizanje više razine kvalitete. Tehnologija rezanja bez naknadne obrade reza snižava sporedne troškove – to je jedan od najnaprednijih ciljeva na putu k poboljšanju natjecateljske sposobnosti, odnosno konkurentnosti poduzeća. Kod izbora određenog postupka rezanja važno je uzeti u obzir sve čimbenike koji utječu na troškove rezanja kako bi se dobila stvarna cijena jednog ili drugog postupka rezanja izražena po satu rezanja odnosno po metru reza. Često se nakon analize može doći i do takvih rezultata kod kojih je postupak koji je jeftiniji po metru reza, u konačnici skuplji uzimajući u obzir i troškove naknadnih operacija.

1.1. Plazma rezanje

Plazma rezanje razvijeno je 1950 – ih godina prošlog stoljeća, prvenstveno zbog rezanja metala koji se nisu mogli rezati sa plinskim plamenom, kao što su nehrđajući čelici, aluminij i bakar. 60 – ih godina dolazi do razvoja preciznog plazma pištolja, čija je ideja bila povećati gustoću snage smanjenjem promjera plazmenog mlaza, kako bi volumen rastaljenog materijala bio što manji. Što je širina reza manja, to je manja količina štetnih plinova i čestica, nastalih prilikom rezanja. Razvojem plazma tehnike s preciznim snopom, može se smanjiti potrošnja električne energije i plina na jednu četvrtinu u odnosu na dotadašnju plazma tehniku. Plazma rezanje razvilo se u ekonomičan postupak koji povezan s automatiziranim CNC sustavima za precizno vođenje pištolja vrlo kvalitetno reže, tako da naknadna obrada reza nije potrebna. Plazma je stanje tvari u kojoj su plinovi ionizirani. Slična je fluidu i često je nazivaju četvrtim agregatnim stanjem. Za dobivanje plazme električni luk se uspostavlja između volframove elektrode spojene na – pol izvora struje i radnog komada (preneseni luk) ili sapnice pištolja uređaja (nepreneseni luk). Nepreneseni luk je podesan za rezanje predmeta koji nisu električki vodljivi (npr. polimera) te za paljenje električnog luka (pilot luk). Za sve druge materijale primjenjuje se preneseni luk kod kojeg se ostvaruje puno veći unos toplinske

energije u radni komad koji je u ovom slučaju dio strujnog kruga (*slika 1.1*). Električni luk održava se u cilindričnom kanalu hlađenim vodom. U kanal se pod tlakom dovodi plin (Ar, H₂, N₂, njihove mješavine te zrak ili kisik) koji se prolaskom električnim lukom disocira i ionizira na račun energije električnog luka. Na taj način dobiva se mlaz plazme visoke temperature (20 000 – 40 000°C) i koncentrirane gustoće snage ($5 \times 10^2 \text{ W/mm}^2$) koji može taljenjem rezati sve metale. Nakon izlaska mlaza plazme iz sapnice dolazi do prenošenja energije preuzete iz električnog luka na rezni komad i plin se vraća u stabilno stanje. [1] [2] [3] [8]



Slika 1.1 Preneseni i nepreneseni luk kod plazma rezanja [4]

Stalna upotreba plazmenog luka kao djelotvornoga reznog alata razumljiva je zbog sljedećih inovacija:

- Precizni plazma pištolj s dodatnim rotirajućim plinom, za metalno sjajne i u pravilu rezove bez srha na Cr-Ni čelicima i aluminijskim legurama
- HiFocus-Quality tehnologija za kvalitetu reza usporedivu s laserom, na konstrukcijskom čeliku i aluminijskim legurama do 8 mm debljine lima
- HiFocus-Speed tehnologija za rezanje konstrukcijskog čelika od 4 do 10 mm debljine, 3 puta većim brzinama rezanja uz kvalitetu reza usporedivu s laserom
- HiFinox-tehnologija za postizanje rezova bez srha, metalno sjajnih površina reza i malog odstupanja od kuta na Cr-Ni čelicima do 6 mm debljine.

Precizno rezanje plazmom može se smatrati odlučujućom tehnologijom koja je pridonijela porastu udjela rezanja plazmom na tržištu, u okviru postupaka toplinskog rezanja. [2]

1.1.1. Postupci rezanja plazmom

Ovisno o zadatku rezanja, vrsti i debljini materijala, danas su na raspolaganju slijedeće varijante postupka:

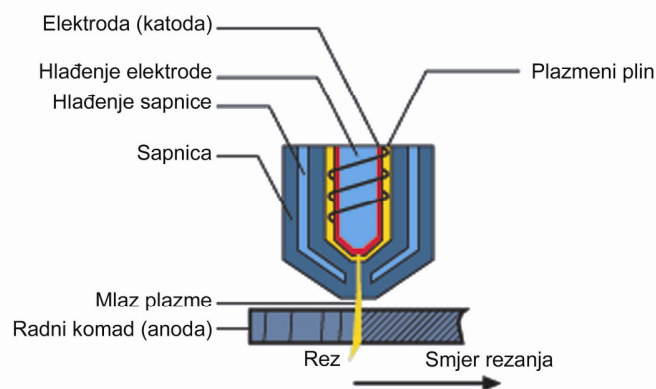
- Rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima (standardna plazma)
- Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem u atmosferskim uvjetima ili u vodi
- Rezanje plazmom sa suženim plazmenim lukom.

1.1.1.1. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija (standardna plazma)

Rezanje plazmom bez sekundarnog medija (*slika 1.2*), koristi se kod:

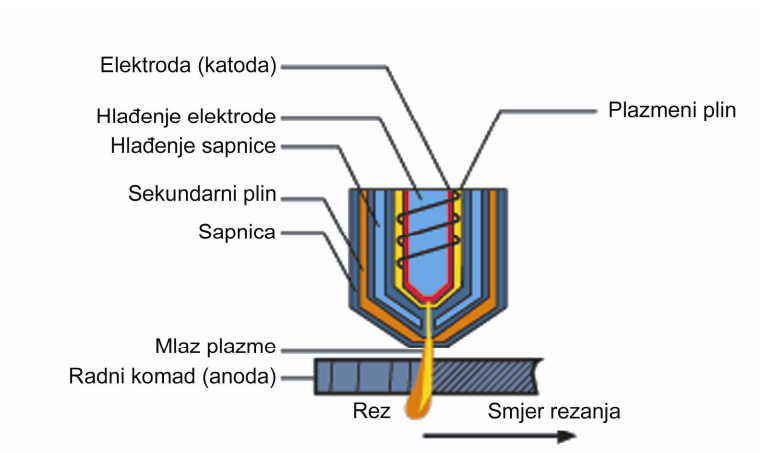
- Ručnog rezanja plazmom i žlijebljenja
- Manjeg broja dijelova koji se režu, odnosno manje debljine limova
- Ne previsokih zahtjeva na kvalitetu reza.

Za ovu inačicu plazma rezanja postoje mnogobrojni slučajevi primjene s CNC upravljanim sustavima za vođenje plazma pištolja, npr. kod proizvodnje panela u brodogradnji, gdje je rezanje plazmom neposredna priprema za zavarivanje, kod završne obrade i pakiranja limova u čeličanicama te kod robotiziranog rezanja cijevi, I-profila i plosnatih profila s izbočinama. Kod plazma rezanja bez sekundarnog medija koristi se samo jedan plin (zrak ili dušik) koji ujedno hladi i razvija luk plazme. Uglavnom se ovaj postupak koristi kod ručnih postupaka rezanja, za materijale tanje od 16 mm i struje do 100 A. [2] [5]



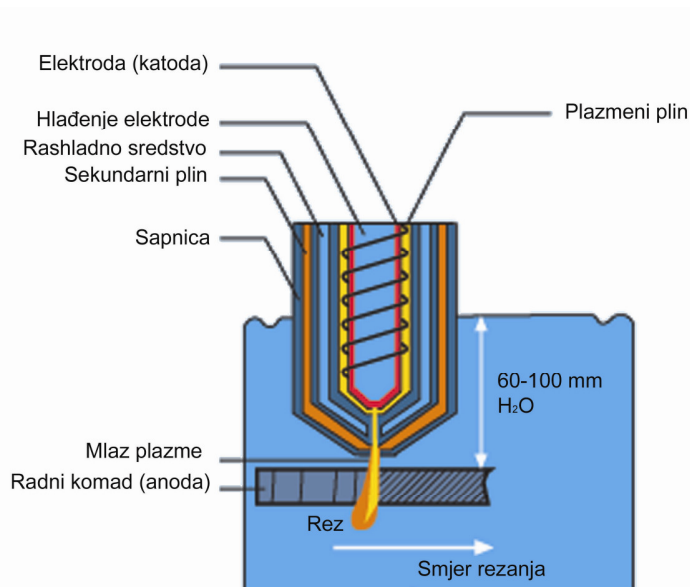
Slika 1.2 Standardni postupak plazma rezanja [4]

1.1.1.2. Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem (rotirajući plin)



Slika 1.3 Plazma rezanje sa sekundarnim medijem [4]

Ovaj postupak rezanja plazmom koristi dva plina: jedan kao plazmeni plin i drugi kao zaštitni plin. Zaštitni plin se koristi za zaštitu područja oko samog reza od utjecaja atmosfere, čime se dobija čišći rez i usmjereniji električni luk. Ova varijanta plazma rezanja je možda i najčešća, jer raznim kombinacijama plinova može se dobiti najbolja moguća kvaliteta reza za zadani materijal. Isto tako ovaj postupak rezanja može se izvoditi i na zraku (*slika 1.3*) i u vodi (*slika 1.4*). U potonjoj varijanti voda se koristi kao zaštitni plin te omogućava bolje hlađenje sapnice i radnog komada, kao i poboljšanu kvalitetu reza kod nehrđajućih čelika. Postupak se koristi samo kod strojnog mehaniziranog rezanja.



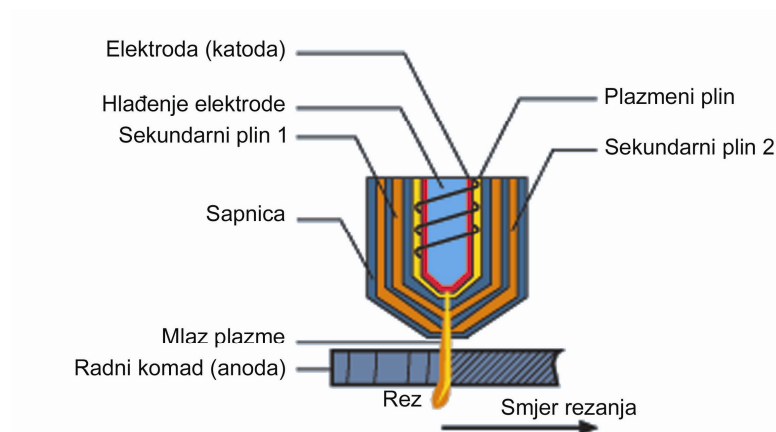
Slika 1.4 Plazma rezanje sa sekundarnim plinom u vodi [4]

Upotreba plazma pištolja s rotirajućim plinom, ima prednost za:

- Proizvodnju manjih dijelova
- Često bušenje, odnosno započinjanje rezanja
- Visoku kvalitetu reza, posebno kod Cr-Ni čelika i kod aluminija
- Rezanje rešetaka, odnosno rezova s prekidima
- Podvodno rezanje plazmom.

Kod plazma rezanja pod vodom radni komad je uronjen 6 - 10 cm u vodu. Isto tako sapnica za vrijeme rezanja je pod vodom. Podvodnim rezanjem značajno se reducira buka te pojava prašine i aerosola, a ultraljubičasto zračenje luka se dodatno filtrira u vodi. Deformacija radnih komada je također vrlo mala, ali je potrošnja energije veća u odnosu na suho rezanje plazmom. Maksimalna debljina lima koji se može rezati suhim rezanjem plazmom iznosi 180 mm pri jačini struje 600 A, a kod podvodnog rezanja iznosi 100 mm pri jačini struje od 750 A. [2] [4] [5]

1.1.1.3. Rezanje plazmom s povećanim sužanjem plazmenog luka



Slika 1.5 Precizno plazma rezanje [4]

Ovim postupkom dobija se superiorniji kvalitetan rez kod rezanja tanjih materijala (do 12 mm) pri manjim brzinama. Poboljšana kvaliteta reza je rezultat korištenja posljednje tehnologije povećanog sužavanja luka povećanjem gustoće energije električnog luka, dok su manje brzine rezanja potrebne kako bi se ostvarili precizniji pomaci kod rezanja. Koristi se samo kod strojnih mehaniziranih postupaka rezanja.

Cilj rezanja plazmom je dobivanje dvije planparalelne, ravne površine reza koje su prikladne za daljnju uporabu bez potrebne međuoobrade odnosno naknadne obrade nakon rezanja. Ali, ipak površina reza ima određeno odstupanje od toga idealnog oblika.

Posebno u području tankih limova-do približno 5 mm debljine, odstupanje može, ovisno o materijalu, razmaku pištolja, jačini struje i brzini rezanja, iznositi do 10°. Korištenjem novorazvijenog postupka preciznog rezanja plazmom „HiFocus“, odstupanje od pravoga kuta značajno se reducira. HiFocus-tehnologija omogućuje dobivanje približno okomitih površina reza za debljine limova od 0,8 do 8 mm i time postizanje značajno veće točnosti. HiFocus tehnologija zasniva se na principu rezanja plazmom sa suženim i stabiliziranim plzmenim mlazom. To se postiže primjenom sapnica manjeg promjera, povećanom rotacijom plazmenog plina i dodatnom primjenom rotirajućeg plina koji do plazmenog luka dolazi kroz koaksijalnu sapnicu bez potencijala. Sapnica za rotirajući plin sprječava između ostalog i nastajanje tzv.dvostrukih električnih lukova i uništenje sapnice kapljicom rastaljenog metala koja nastaje zbog štrcanja prilikom bušenja rupa.

Za mnoge primjene, visoka kvaliteta reza i preciznost, koja se postiže HiFocus-tehnologijom, predstavlja što se troškova tiče povoljniju alternativu u odnosu na rezanje laserom. Pomoću HiFocus uređaja i postrojenja za rezanje plazmom, može se održavati tolerancija radnog komada $\pm 0,2$ mm.

Područje upotrebe Hi-Focus plazma uređaja je višestruko:

- S tehnologijom „HiFocus-Quality“ postiže se kvaliteta reza usporediva s laserom, kod rezanja konstrukcijskih čelika i aluminijskih legura debljine od 1 do 8 mm; struja rezanja 20 do 50 A.
- S tehnologijom „HiFocus-Speed“, postiže se tri puta veća produktivnost, kod rezanja debljine 4-10 mm, ali je tada odstupanje od pravog kuta minimalno povećano; struja rezanja 50-100 A.
- FineFocus tehnologija koristi se sa strujama 40-130 A, kako za rezanje konstrukcijskih čelika tako i za rezanje Cr-Ni čelika i aluminijskih legura, za limove debljine od 6 do 25 mm.

1.1.2. Parametri procesa

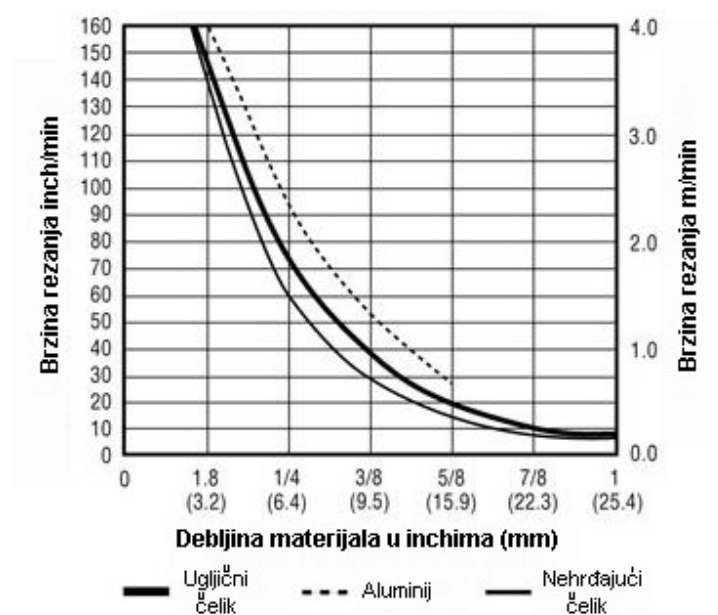
Najvažniji parametri procesa koji najviše utječu na kvalitetu u procesu rezanja plazmom:

- jakost struje,
- tlak plina,
- brzina rezanja,
- (is)trošenje katode,
- (is)trošenje sapnice.

(Is)trošenje sapnice ima najveći utjecaj na okomitost reza i toleranciju nagiba. Na drugom je mjestu (is)trošenje katode. U razmatranju interakcija između parametara može se zaključiti najveći utjecaj brzine rezanja i jakosti struje na pravokutnost reza.

Jakost struje kod rezanja ovisi o materijalu koji se reže te o veličini sapnice. Kako bi se optimizirala produktivnost i brzina rezanja, koristi se najveća sapnica te najveća struja koju sustav vođenja sapnice dozvoljava. Kako bi se optimizirala kvaliteta reza potrebno je rezati manjim brzinama, sa manjom sapnicom i manjom jakosti struje što kao rezultat daje ravniji (s malim nagibom) i kvalitetniji rez.

Brzina rezanja koja je premala ili prevelika uzrok je lošoj kvaliteti reza. Zato, kod rezanja različitih materijala postoje optimalni uvjeti koji će osigurati ravan i čist rez bez troske. Ako je brzina rezanja prevelika luk će zaostajati i oscilirati što će uzrokovati stepeničaste brazde u obliku slova S, veliki nagib reza te nastajanje troske na donjoj strani reza. Trosku koja nastaje kao produkt prevelike brzine reza je teško ukloniti, što zahtjeva naknadno brušenje. Ako je brzina prevelika može doći i do toga da plazma ne penetrira skroz kroz materijal. Ako je brzina rezanja premala, širina reza će biti veća, a rastaljeni materijal neće biti ispuhan plinom nego će se nakupljati na dnu reza kao troska koju je lako ukloniti za razliku od troske koja nastaje kod prevelike brzine rezanja. Najbolji način procjene brzine rezanja je promatrati luk koji bi trebao biti vertikalni u odnosu na radni materijal odnosno nagib luka na izlaznom bridu bi trebao biti nula. Poznavajući brzinu postupka rezanja (*slika 1.6*) za određenu debljinu materijala može se lako odrediti kapacitet proizvodnje, što je najčešće izraženo u metrima reza po satu ili broju komada po satu ako su komadi jednoznačni.



Slika 1.6 Dijagram brzine rezanja u ovisnosti o debljini materijala [6]

Rezanje plazmom različitih materijala i debljina ne može se optimalno izvoditi uporabom samo jednog plazmenog plina. Za dobivanje reza koji ne treba naknadnu obradu potrebno je prilagoditi plazmeni i dodatni plin, materijalu koji se reže. Djelovanje pojedinih plinova, odnosno plinskih mješavina na kvalitetu reza, a time i na troškove prikazano je u *tablici 1.1*.

Tablica 1.1 Kombinacije plinova kod rezanja plazmom [2]

Materijal	Plazmeni plin	Dodatni plin	Opaska
Konstrukcijski čelik	Zrak	Zrak	moguće stvaranje nitrda na površini reza
	Kisik	Zrak ili kisik	nema stvaranja nitrda na površini reza manje troske nego kod zraka troska se lako uklanja dugi vijek trajanja pomoću XL-Life-Time-sustava
	Kisik	Kisik ili kisik/dušik	kvaliteta reza usporediva s laserom u području tankih limova (HiFocus)
Visokolegirani čelik	Zrak	Zrak	hrapava i oksidirana površina reza malo srha
	Argon/vodik	Dušik	glatka i sjajna površina reza pojava srha pri malim debljinama
	Argon/vodik/dušik	Dušik	glatka i sjajna površina reza zbog dušika manji srh ili bez srha
	Dušik	Dušik/vodik	sjajna površina reza bez srha u području tankih limova (HiFinox)
Aluminijske legure	Zrak	Zrak	hrapava površina reza
	Argon/vodik	Zrak ili dušik	glada površina reza nego sa zrakom približno okomita površina reza
	Zrak	Dušik/vodik	okomita površina reza u području tankih limova (HiFocus)

1.2. Lasersko rezanje

Laseri su uređaji koji proizvode elektromagnetska zračenja u području vidljive svjetlosti, ultravioletnog i infracrvenog spektra. Laser je akronim od engleskih riječi Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation koji označava princip pojačanja svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja, a zapravo je svjetlosni oscilator, odnosno generator koherentnog laserskog zračenja.

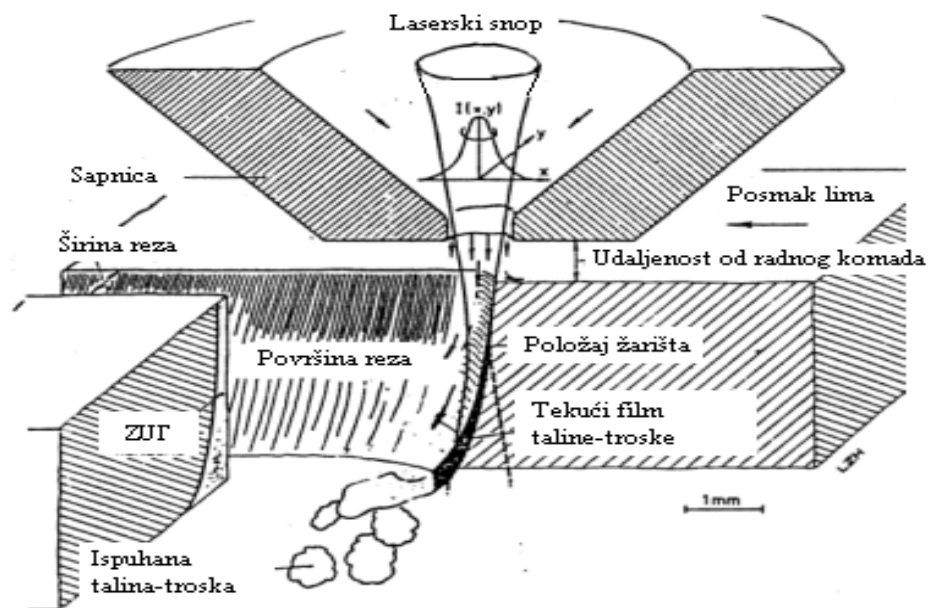
Laser je generator svjetlosti koja ima slijedeća svojstva:

- monokromatska (jedna valna duljina),
- usmjerena (mala divergencija),
- koherentna (valovi su iste faze i amplitude).

Glavno svojstvo ovakve svjetlosti je mogućnost fokusiranja na točku malog promjera (< 1 mm), što je nemoguće kod prirodne svjetlosti.

Lasersko rezanje je najraširenija industrijska aplikacija lasera. Pri samom procesu rezanja fokusirani snop prolazi kroz sapnicu ~ 1 mm. Položaj žarišta snopa z , nalazi se na površini radnog komada ili malo ispod ($z =$ od 0 do $-0,5$ mm). Udaljenost sapnice od radnog komada iznosi 0,5 do 1 mm. Mlaz plina iz sapnice sudjeluje u procesu rezanja ispuhujući rastaljeni metal, te štiti optiku za fokusiranje

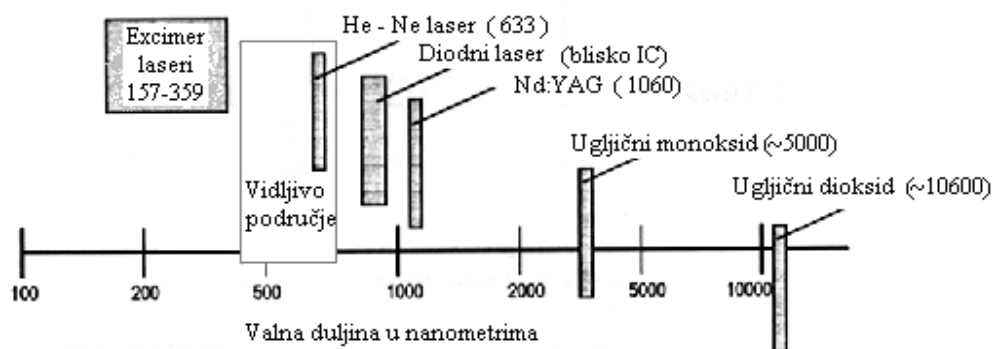
od štrcanja i dima. Fokusna optika ujedno je gornji dio komore kroz koju se stlačeni plin dovodi do sapnice. [9] [10]



Slika 1.7 Shema rezanja laserom [10]

1.2.1. Vrste lasera

Laseri se razlikuju prema vrsti aktivnog materijala u kojem se događa pojačanje svjetlosti. Za zavarivanje i rezanje se upotrebljavaju CO₂ i ND:YAG laseri, koji su dobili ime prema vrsti aktivnog materijala. Karakteristika svakog lasera je valna duljina emitirane svjetlosti- λ , koja je funkcija razlike energetske stanja atoma/molekula aktivnog medija.



Slika 1.8 Valne duljine industrijskih lasera [10]

CO₂ – plinski laser (aktivni materijal je mješavina plinova N₂, He, CO₂), emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ($\lambda=10600$ nm) i snage do 45 kW. CO₂ laser koristi se pretežno za rezanje, ali i za zavarivanje. Nd:YAG kruti laser (aktivni materijal je Nd:YAG kristal), emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ($\lambda=1064$ nm) i snage do 6 kW. Nd:YAG laser koristi se za označavanje, zavarivanje i rezanje elektroničkih komponenti te u mikromehanici. Povećanjem snage lasera preko 1 kW sve je češća primjena ovih lasera za zavarivanje i rezanje debljih strukturnih elemenata. Valne duljine oba lasera nalaze se u infracrvenom području, pa tako nisu vidljive prostim okom.

Tablica 1.2 Usporedba CO₂ i ND: YAG lasera [10]

Naziv lasera	CO ₂	Nd:YAG
Aktivni medij	Plinoviti (mješavina CO ₂ , N ₂ , He)	Nd:YAG kristal
Uzbuda	Električno pražnjenje	Lampe
Valna duljina nm	10600	1060
Srednja snaga kW	0,1 – 45	0,1 – 5,5
Vršna snaga kW	0,1 – 50	0,1 – 100
Frekvencija impulsa kHz	cw – 100	cw – 50
Iskoristivost %	5 – 15	1 – 4
Kvaliteta snopa M ²	1 – 3	1 – 2 za specijalnu primjenu 10 – 100 uobičajeno
Potrošni dijelovi	Plinovi CO ₂ , N ₂ , He	Lampe
Transmisivna optika	ZnSe, GaAs	Kvarc
Refleksivna optika	Metal	Metal ili dielektrik
Optičko vlakno	Ne postoji	Kvarc
Sigurnosni-nepropusni materijal	Akril, staklo	Filteri
Investicijski trošak prema snazi €/W	50 – 200	100 – 400

1.2.2. Varijante rezanja laserom

Rezanje isparavanjem – do ovog procesa dolazi kada laserski snop zagrije i ispari materijal u zoni reza, koji se onda izbacuje uz pomoć mlaza plina za rezanje. Ova varijanta rezanja se upotrebljava kod materijala koji se ne tale, kao što su drvo i neki polimeri. Plina za rezanje je najčešće zrak ili dušik, dok se za neke primjene i materijale koristi i argon.

Rezanje taljenjem – kod ove varijante rezanja laserom rastaljeni se materijal ispuhuje s mlazom plina iz zone reza, što zahtijeva manji unos energije nego kod rezanja isparavanjem. Plinovi za rezanja su zrak, dušik i u nekim aplikacijama argon. Tlak plina za rezanje obično iznosi nekoliko bara, ali moguće je i rezanje visokim tlakom do oko 30 bara, kojim se postižu velike brzine rezanja. Mogu se rezati metali i nemetali koji se tale, a zbog manjeg unosa energije širina reza i ZUT-a je vrlo mala te je bolja kvaliteta površine reza.

Rezanje izgaranjem – ova varijanta rezanja laserom koristi dodatni izvor topline koji je nastao egzotermnom reakcijom plina za rezanje i radnog komada. Plin za rezanje je kisik ili mješavina bogata kisikom. Egzotermna reakcija dodaje energiju procesu rezanja, pa se mogu postići i dvostruko veće brzine rezanja nego kod rezanja taljenjem. Površina reza je oksidirana, ali kod konstrukcijskih čelika taj se sloj oksida lako uklanja. Kod nehrđajućeg čelika troska je viskoznija (nikal se teško oksidira), pa može ostati na donjem rubu reza i teže se uklanja. Osim čelika titan i njegove legure se dobro režu kisikom, ali rezultat su i osjetljivija površina reza na pukotine. To se ne može prihvatiti za primjenu gdje se traži visoka kvaliteta, za što se titan najčešće i koristi.

1.2.3. Parametri procesa

Parametara kod rezanja laserom ima mnogo, no najvažniji su: P (W)-snaga lasera, v (m/min)- brzina rezanja, plin za rezanje (O₂, N₂, Ar, tlak plina ...), promjer žarišta, položaj žarišta u odnosu na sapnicu, promjer sapnice za rezanje (0,5 do 1,5 mm), udaljenost sapnice od radnog komada (0,3 do 1 mm).

CO₂, Nd:YAG i laseri koriste se za rezanje, ali je CO₂ laser dominantan. Snaga CO₂ lasera za rezanje može biti do 40 kW, a tipična snaga lasera za rezanje je od 0,5 do 2,5 kW. Impulsni Nd:YAG laseri prosječne snage nekoliko stotina wata koriste se za precizno rezanje, dok se za rezanje debljih limova koriste impulsni i cw laseri snage koja može biti do 6 kW. Kontinuirani način rada je stabilniji i daje bolju kvalitetu reza, ali impulsni ima prednost kod visokorefleksivnih materijala jer daje visoku vršnu snagu, potrebnu za prevladavanje početne refleksije.

Brzina rezanja prvenstveno ovisi o vrsti i debljini materijala, kao i o dostupnoj snazi lasera. Brzine rezanja obično oznose od 0,5 m/min pa do desetaka m/min kod rezanja tankih limova i polimera. Cilj je dobiti što bolju kvalitetu površine reza sa što većom brzinom rezanja. Kako se s najjačim parametrima ne može postići dobra kvaliteta reza, definiraju se dvije brzine:

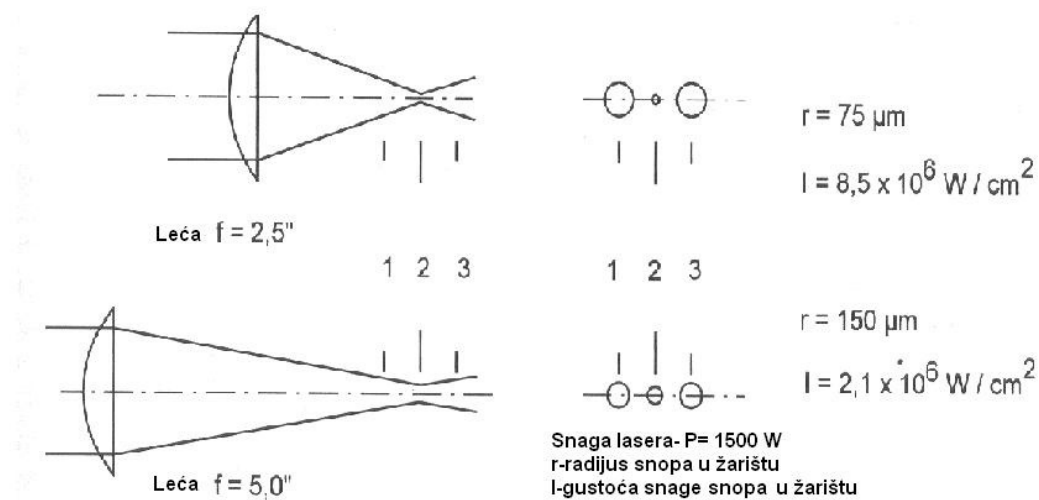
- Maksimalna brzina rezanja-daje rez bez srha, ali s povećanom hrapavošću
- Optimalna brzina rezanja-daje rez bez srha s dobrom hrapavošću, $v_{opt} \sim 2/3 * v_{max}$.

Brzine rezanja se određuju eksperimentalno, a počinje se od preporuke proizvođača.

Tablica 1.3 Mogućnosti rezanja različitih materijal CO₂ laserom snage 1 kW [10]

	Rezljivost	Maksimalna debljina mm	Brzina rezanja (m/min) za debljinu 2
Čelik	+++++	15	6
Nehrđajući	++++	10	5
Aluminij	++	6	3,5
Titan	+++	10	8
Nikal	++	3	2-6
Bakar	+	3	0,5
Mjed	+	3	1,5
Keramika	+++++	5	-
Akril	+++++	25	5
Najlon	+++++	20	-
Drvo	++++	25	2
Staklo	++++	5	2
Guma	+++	5	3,5
Koža	+++++	12	-
Papir	+++++	6	25

Žarišna duljina leće f definira promjer žarišta. Leća s kraćom žarišnom duljinom fokusira snop na manji promjer žarišta, što daje veću gustoću snage, *slika 1.9*.



Slika 1.9 Usporedba leća žarišnih duljina f od 2,5 i 5 inča (63,5 i 127 mm) [10]

Položaj žarišta i razmak sapnice od radnog komada imaju kod rezanja laserom najznačajniju ulogu. Svaki pomak od namještene vrijednosti odražava se na pogoršanju kvalitete reza. Stoga se koriste senzori za kontrolu položaja žarišta, odnosno udaljenosti sapnice od radnog komada.

1.3. Toplinsko rezanje – Razredba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće (ISO 9013:2002; EN ISO 9013:2002)

1.3.1. Područje primjene

Međunarodna norma odnosi se na materijale koji su prikladni za plinsko rezanje te rezanje plazmom i laserom. Primjenjuje se za plinske rezove od 3 mm do 300 mm, plazma rezove od 1 mm do 150 mm i za rezove laserom od 0,5 mm do 40 mm. Ova međunarodna norma uključuje geometrijsku specifikaciju proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće. Geometrijske specifikacije proizvoda su primjenjive ako je napravljena referenca prema ovoj međunarodnoj normi u crtežima ili relevantnim dokumentima. Isto tako ukoliko se norma primjenjuje za druge postupke rezanja (npr. rezanje vodenim mlazom), mora se naknadno dobiti odobrenje za korištenje norme. Slijedeći dokumenti norme sadrže odredbe koje su potkrijepljene referencama u tekstu, uključujući i odredbe ove međunarodne norme:

ISO 1101:1983, Tehnički crteži – Geometrijska odstupanja – Odstupanja oblika, položaja, orijentacije – Definicije, simboli, oznake na crtežu

ISO 1302:2002, Geometrijske specifikacije proizvoda – Oznaka sastava površine u tehničkoj dokumentaciji

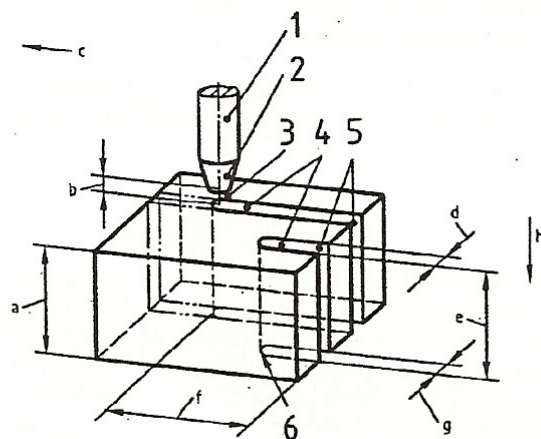
ISO 2553, Zavareni, lemljeni spojevi – Prikazivanje na crtežima

ISO 8015, Tehnički crteži – Osnovni principi označavanja odstupanja ...

Za dane reference, naknadne dopune i promjene nisu dozvoljene.

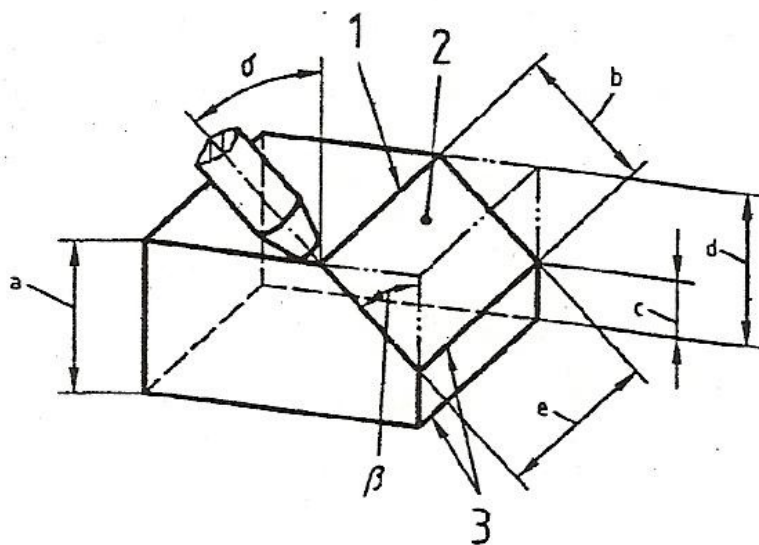
1.3.2. Izrazi i definicije objašnjeni slikama

Za uporabu ove međunarodne norme upotrebljavaju se slijedeći izrazi i definicije koji su prikazani i objašnjeni slikama. Imenice koje se odnose na proces rezanja biti će oblikovane korištenjem riječi „rezanje“, dok imenice koje se odnose na obavljanje reza formirat će se korištenjem riječi „rez“. *Slika 1.10* pokazuje izraze koji se odnose na proces rezanja radnog komada nakon početka samog procesa rezanja, dok *slika 1.11* pokazuje izraze koji se odnose na gotovi radni komad. *Slike 1.12 i 1.13* pokazuju tipove pravocrtnog reza i reza po konturi.



- 1 – Gorionik
- 2 – Sapnica
- 3 – Zraka/Plamen/Električni luk
- 4 – Širina reza
- 5 – Početak reza
- 6 – Kraj reza
- a – Debljina radnog komada
- b – Udaljenost sapnice od radnog komada
- c – Smjer napredovanja rezanja
- d – Širina gornjeg reza
- e – Debljina reza
- f – Duljina reza
- g – Širina donjeg reza
- h – Smjer rezanja

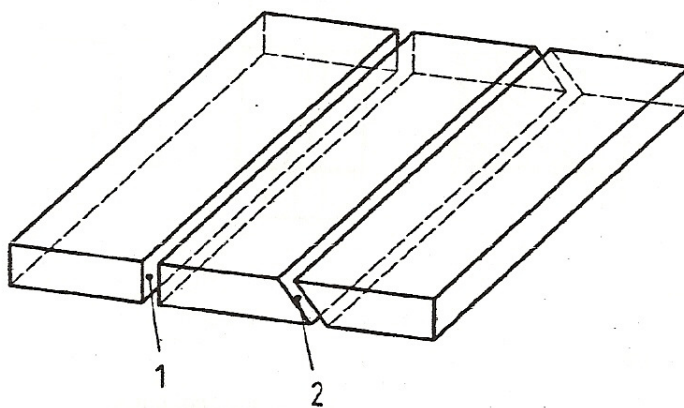
Slika 1.10 Proces rezanja radnog komada s odgovarajućim izrazima [11]



- 1 – Gornji rub reza
- 2 – Površina reza
- 3 – Donji rub reza

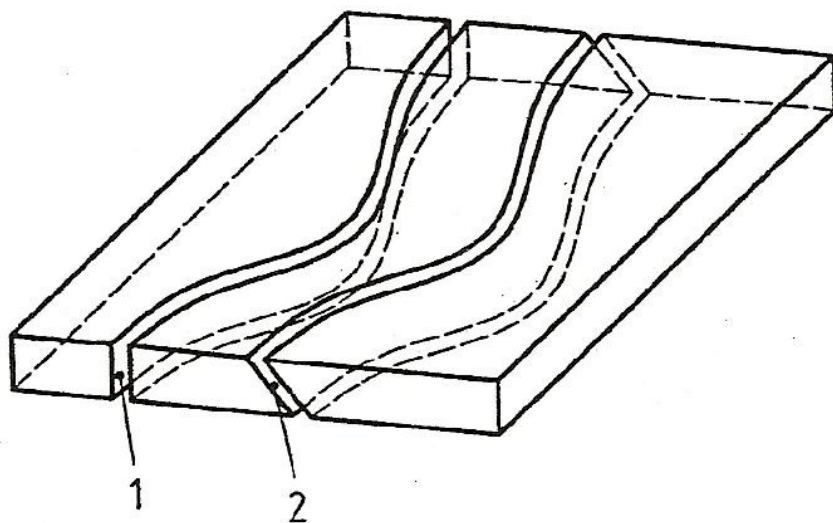
- a – Debljina radnog komada
- b – Debljina reza (prva mogućnost)
- c – Dubina lica korijena/debljina reza (prva mogućnost)
- d – Debljina reza (druga mogućnost)
- e – Duljina reza

Slika 1.11 Gotovi radni komad s odgovarajućim izrazima [11]



- 1 – Vertikalni rez
- 2 – Kosi rez

Slika 1.12 Tipovi pravocrtnog reza [11]



1 – Vertikalni rez

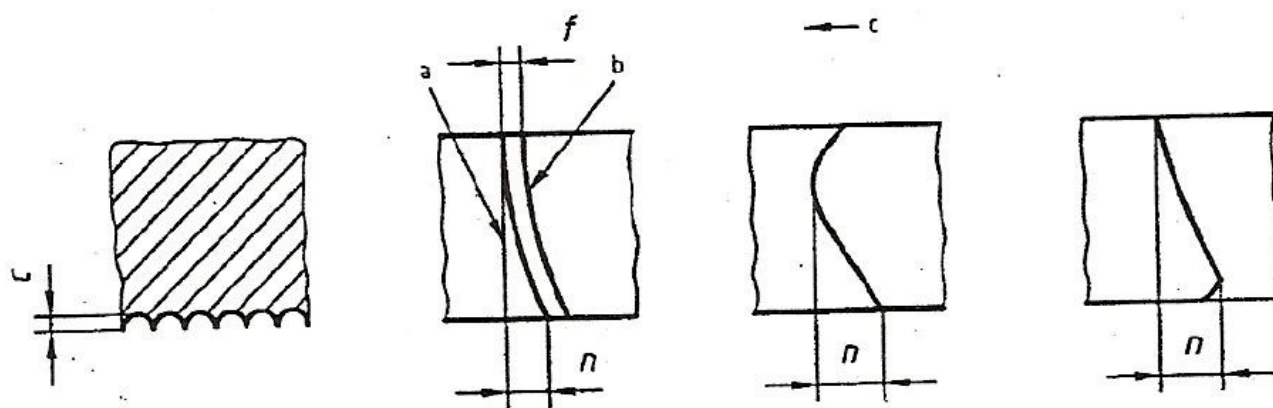
2 – Kosi rez

Slika 1.13 Tipovi konturnog reza [11]

Brzina rezanja – relativna brzina između alata i radnog komada.

Širina reza – udaljenost od površine reza do gornjeg ruba reza ili udaljenost do kraja postojećeg taljivog gornjeg ruba.

Rezna linija; n – projicirana udaljenost između dvije točke rezne linije u smjeru rezanja (*slika 1.14*).



a – Referentna linija

b – Rezna linija

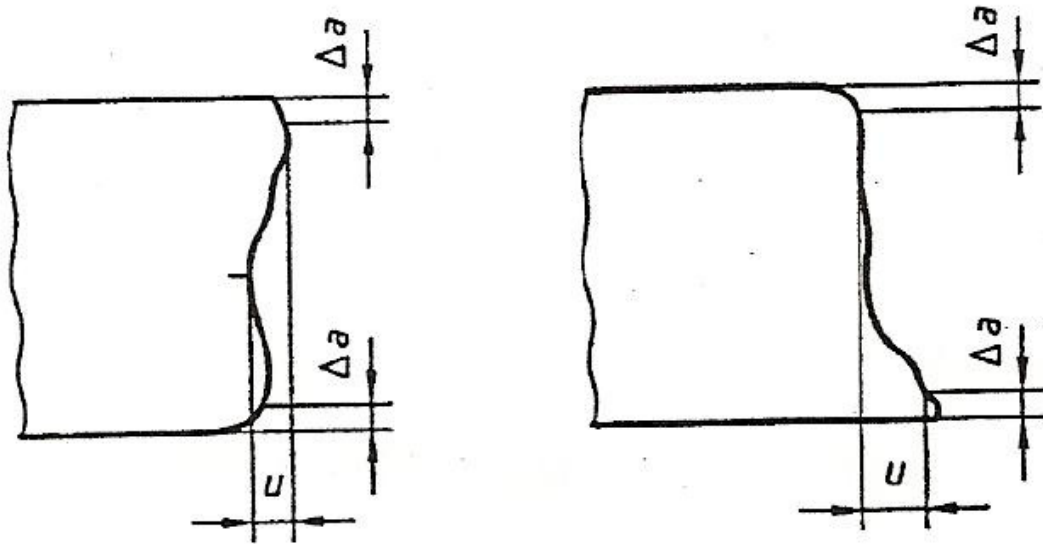
c – Smjer rezanja

Slika 1.14 Rezna linija [11]

Tolerancije kuta ili okomitosti

u – udaljenost između dva pravca (tangente) kojima je opisana površina reza, unutar kuta namještanja (npr. 90° u slučaju vertikalnih rezova).

Zabilješka: tolerancije kuta ili okomitosti ne uključuje samo okomitost nego i odstupanje od ravnoće. Slika 1.15 pokazuje maksimalna odstupanja unutar klase tolerancije.



Δa – smanjenje debljine

u – tolerancija okomitosti ili kutnosti

Slika 1.15 Tolerancija okomitosti ili kutnosti (vertikalni rez) [11]

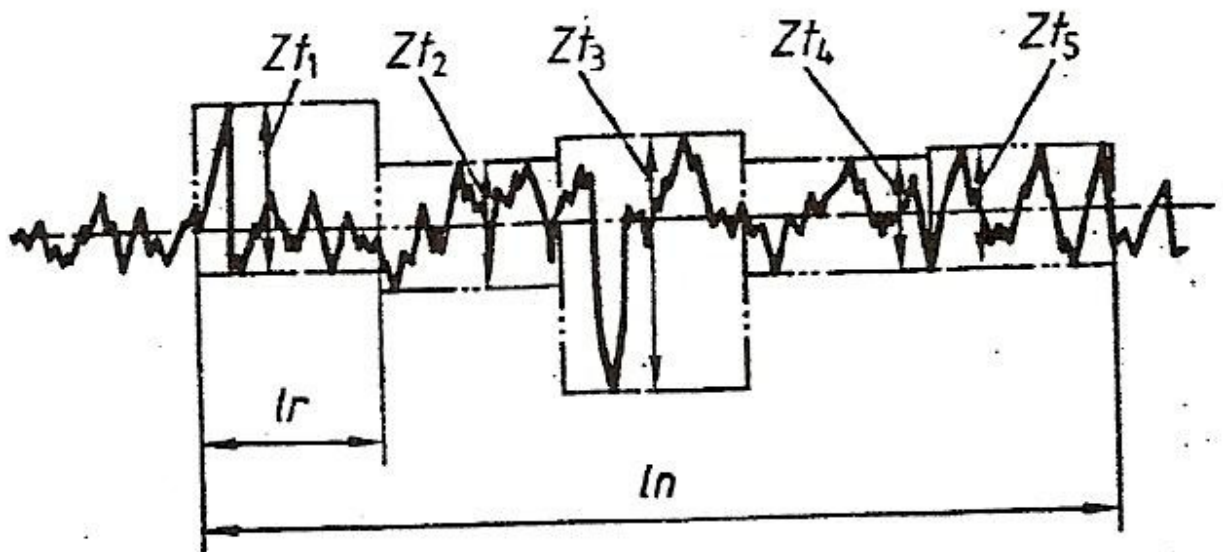
Visina profila

Z_t – zbroj visine vrha i dubine dna elementa profila.

Prosječna visina neravnina

Rz_5 – aritmetička sredina od pet pojedinačnih izmjerenih udaljenosti profila.

Zabilješka: Indeks 5 u Rz_5 dodan je kako bi se istaknula aritmetička sredina i maksimalna visina profila od pet pojedinačnih elemenata.



$Z_{t1} - Z_{t5}$ – pojedinačne visine profila

l_n – duljina vrednovanja

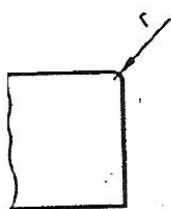
l_r – pojedinačna duljina uzorka profila hrapavosti (1/5)

Slika 1.16 Prosječna visina neravnina [11]

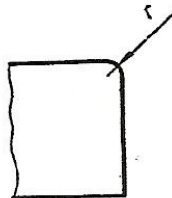
Taljivi gornji rub

r – mjeri karakteristični oblik gornjeg ruba reza.

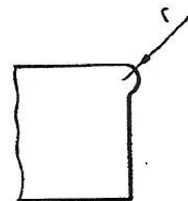
Zabilješka: Može biti oštar rub, rastopljeni rub ili u obliku izbočine gornjeg ruba.



a) Oštri rub



b) Rastopljeni rub

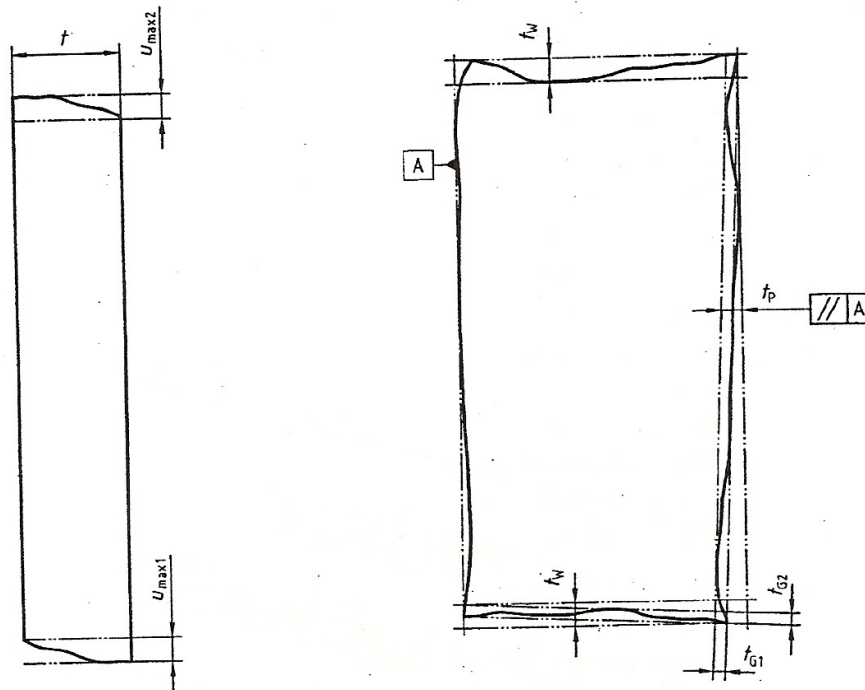


c) Gornji rub kao izbočina

Slika 1.17 Taljivi gornji rub [11]

Oblici i položaji tolerancija

Slika 1.18 pokazuje maksimalna odstupanja unutar klase tolerancije.



u – tolerancija okomitosti u smjeru rezanja

t_w – tolerancija okomitosti za širinu reza koja se odnosi na plohu A

t_p – tolerancija paralelnosti za širinu reza koja se odnosi na plohu A

t_{G1} – tolerancija ravnoće za duljinu reza

t_{G2} – tolerancija ravnoće za širinu reza

t – debljina radnog komada

Slika 1.18 Oblici i položaji tolerancija pokazani na izrezanom limu [11]

1.3.3. Određivanje kvalitete reznih površina

Slijedeći zahtjevi iznose i pokazuju procedure mjerenja kao i mjerne instrumente pomoću kojih je moguće odrediti i vrednovati karakteristične vrijednosti reznih površina.

Pri izboru mjernih instrumenata, mora se voditi računa da moguće greške ne prelaze 20% vrijednosti od karakterističnih vrijednosti koje trebaju biti izmjerene. Tablice 1.4 i 1.5 pokazuju točnost i hrapavost mjernih instrumenata za karakteristične vrijednosti.

Tablica 1.4 Točnost mjernih instrumenata [11]

Oznaka	Granice greške	Primjeri
u	0,02 mm	Kut kontaktne točke igle $\leq 90^\circ$ Polumjer kontaktne točke igle $\leq 0,1$ mm
Rz5	0,002 mm	Točnost mjernog instrumenta, npr. električna kontaktna igla instrumenta za kontinuirano skeniranje u smjeru rezanja
n	0,05 mm	Mjerenje mikroskopom s poprečnim žicama i vodilicom s dovoljnom podesivošću
r	0,05 mm	Specijalni uređaj za skeniranja profila gornjeg ruba reza s skalom mjernog uređaja
Ravnoća	0,2 mm	Čelična žica s max. promjerom 0,5 mm, ticalo

Tablica 1.5 Hrapavost mjernih instrumenata [11]

Oznaka	Granice greške	Primjeri
u	0,1 mm	Tro-pravokutnik (imamo mogućnost mjerenja pravog kuta prema tri površine u odnosu na kladu mjernog instrumenta), za kose rezove
Rz5	-	
n	0,2 mm	Tro-pravokutnik za kose rezove, klizni pravi kut ili kut namještanja, za ovu namjenu se koristi kosi mjerač s pretvaranjem kuta rezne linije u duljinu rezne linije
r	0,1 mm	Koveksni mjerač
Ravnoća	0,2 mm	Čelična žica s max. promjerom 0,5 mm, ticalo

1.3.3.1. Uvjeti za mjerenje

Mjerenja se trebaju izvršiti na brušenoj površini, bez prisutnosti oksida na površini reza i ostalih nesavršenosti. Kao referentni element uzimaju se gornja i donja površina reza radnog komada. Te površine također trebaju biti očišćene.

Za definiranje ravnoće, referentni element i ravna mjerna linija trebaju biti centrirane jedna s drugom, tako da maksimalna udaljenost između mjernih linija i stvarne površine bude minimalna.

1.3.3.2. Točka mjerenja

Broj i položaj točaka mjerenja ovisi o obliku i veličini radnog komada i ponekad o namijenjenoj upotrebi. Slijedeći navodi mogu poslužiti kao smjernica.

Rezne površine su klasificirane u polja tolerancija prema maksimalnim izmjerenim vrijednostima. Prema tome, točke mjerenja trebaju biti smještene na mjesta gdje se mogu očekivati maksimalne izmjerene vrijednosti. Pri odabiru točaka mjerenja treba uzeti u obzir činjenicu da se maksimalne vrijednosti stvarne visine profila i tolerancije okomitosti i kutnosti mogu naći na različitim mjestima reza. Ako se izmjerene vrijednosti nalaze u donjem dijelu polja tolerancije, trebaju biti izvršena dodatna mjerenja prema vizualnom odabiru mjesta gdje se mogu očekivati maksimalne vrijednosti. Ako se izmjerene vrijednosti nalaze u gornjem dijelu polja tolerancije ili ako postoje određene sumnje u pogledu dobivenih rezultata, trebaju biti izvršena pomoćna mjerenja na istom broju sa dodatnim točkama mjerenja.

1.3.3.3. Broj točaka mjerenja

Broj i položaj točaka mjerenja treba biti definiran od strane proizvođača.

Ako zahtjev nije specificiran, izvršiti slijedeća mjerenja:

u – dva puta po tri mjerenja na udaljenostima od 20 mm jednog od drugog mjerenja po metru reza

Rz5 – jedno mjerenje izvršeno jednom po svakom metru reza.

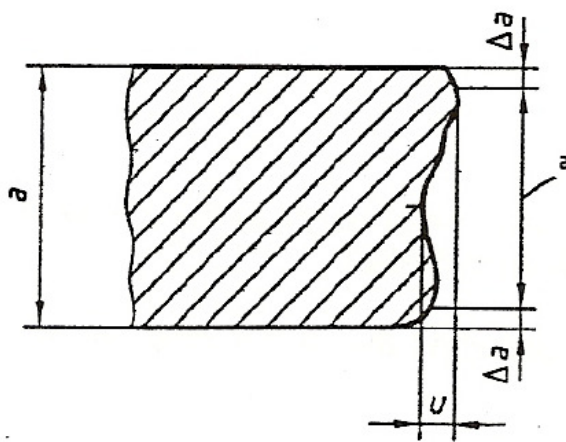
1.3.3.4. Položaj točaka mjerenja

Karakterističnu vrijednost tolerancija okomitosti ili kutnosti samo je moguće odrediti u graničnom području površine reza. Površina se treba smanjivati sa dimenzijom \sqrt{A} prema *tablici 1.6* od gornjeg i donjeg ruba površine reza.

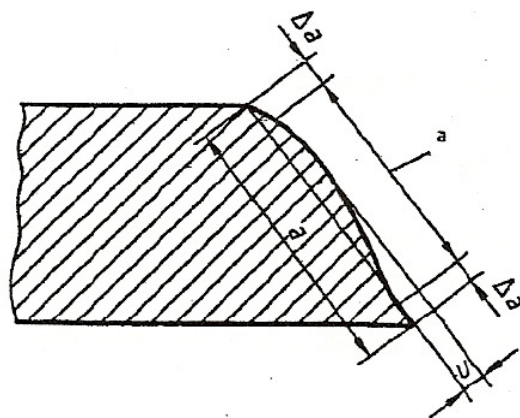
Razlog za smanjenje profila reza je dopuštanje taljenja gornjeg ruba reza.

Tablica 1.6 Dimenzije \sqrt{a} [11]

Debljina reza, a mm	\sqrt{a} , mm
≤ 3	0,1 a
$> 3 \leq 6$	0,3
$> 6 \leq 10$	0,6
$> 10 \leq 20$	1
$> 20 \leq 40$	1,5
$> 40 \leq 100$	2
$> 100 \leq 150$	3
$> 150 \leq 200$	5
$> 200 \leq 250$	8
$> 250 \leq 300$	10



a) Vertikalni rez



b) Kosi rez

a – područje za određivanje tolerancija okomitosti i kutnosti

Slika 1.19 Definicija raspona mjerenja za tolerancije okomitosti ili kutnosti [11]

Za debljine reza ispod 2 mm, procedura mjerenja tolerancija okomitosti i kutnosti mora biti naknadno dogovorena.

Karakteristična vrijednost prosječne visine neravnina može biti određena samo u graničnom području površine reza. Mjerenje se izvršava u točki maksimalne hrapavosti površine debljine reza, u skladu s ISO 4288. Za plinsko rezanje kao i za plazma rezanje, mjerenja se uobičajeno izvršavaju

na udaljenostima od oko $\frac{2}{3}$ debljine reza od gornjeg ruba reza. Za debljine reza ispod 2 mm, mjerenje se izvršava na udaljenosti od oko $\frac{1}{2}$ debljine reza od gornjeg ruba reza.

Karakteristične vrijednosti za površine reza biti će određene u skladu s tipom mjerenja, pomoću odgovarajućih mjernih instrumenata navedenih u tablicama 1 i 2.

Prosječna visina neravnina Rz5 treba biti mjerena svako 15 mm duljine reza u smjeru rezanja. Mjerenje treba izvesti u skladu s ISO 4288 koristeći ispitivač koji je opisan u ISO 3274.

1.3.4. Kvaliteta površine reza

1.3.4.1. Karakteristične vrijednosti

Kvaliteta površina reza toplinski obradljivih reznih materijala opisana je slijedećim karakterističnim vrijednostima:

- a) tolerancija okomitosti ili kutnosti, u
- b) prosječna visina neravnina, Rz5.

Mogu se također koristiti slijedeće karakteristične vrijednosti:

- c) rezna linija, n
- d) taljivi gornji rub, r
- e) mogući nastanak troske ili taljivih kapljica na donjem rubu reza.

1.3.4.2. Rasponi mjerenja

Za kvalitetu, rasponi tolerancija okomitosti i kutnosti, u, i prosječne visine neravnina, Rz5, trebaju biti naznačeni po redoslijedu u, Rz5. Gdje nije utvrđena vrijednost, treba biti naznačena nula (0).

Ukoliko je uključeno lasersko rezanje, klasifikacija kvalitete je bazirana na rezultatima dobivenima na nelegiranim čelicima.

Pojedine greške, kao neizbježno stvaranje taljivih mjehura na donjem rubu reza, ili ostaci oksida na površini reza nisu uzimane u obzir pri definiranju vrijednosti kvalitete ovog međunarodnog standarda.

1.3.4.3. Tolerancija okomitosti ili kutnosti

Rasponi za tolerancije okomitosti ili kutnosti su prikazane u *tablici 1.7* i na *slici 1.20*.

Tablica 1.7 Rasponi tolerancija okomitosti ili kutnosti, u [11]

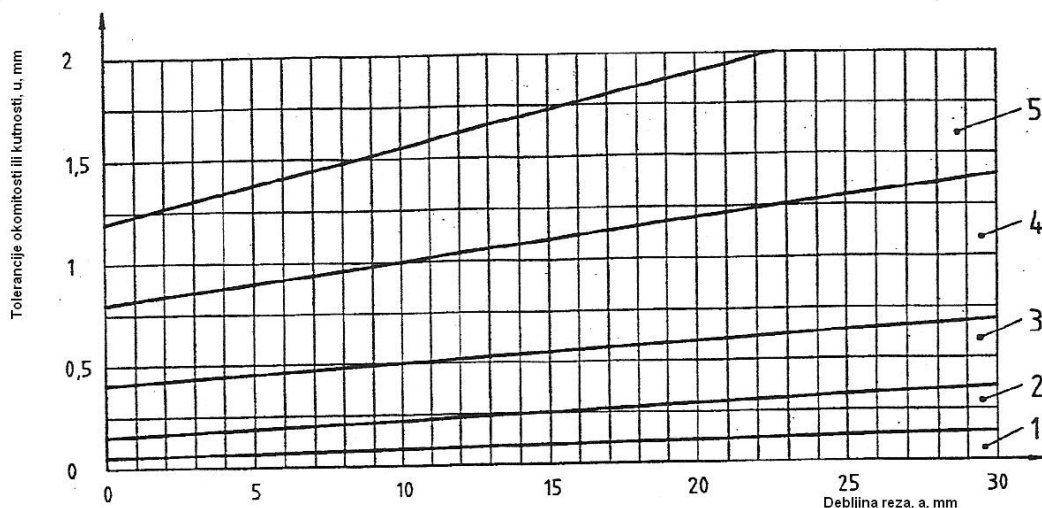
Raspon	Tolerancije okomitosti ili kutnosti, u, mm
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$

1.3.4.4. Prosječna visina neravnina, Rz5

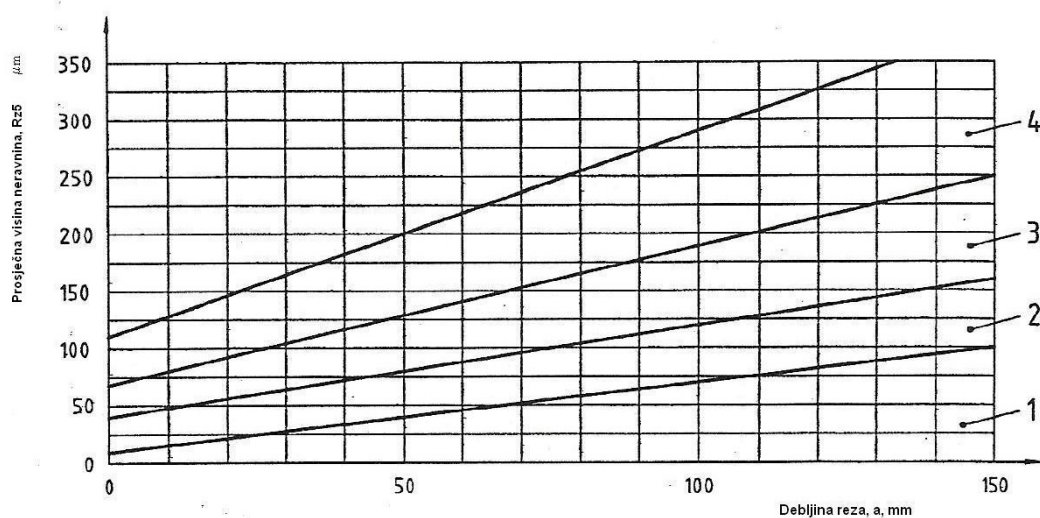
Rasponi za prosječnu visinu neravnina Rz5 su prikazani u *tablici 1.8* i na *slici 1.21*.

Tablica 1.8 Rasponi prosječnih visina neravnina, Rz5 [11]

Raspon	Prosječna visina neravnina, Rz5, μm
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,2a \text{ mm})$



Slika 1.20 Tolerancije okomitosti ili kutnosti, u – debljine radnog komada do 30 mm [11]



Slika 1.21 Prosječna visina neravnina, Rz5 – debljine radnog komada do 150 mm [11]

1.3.5. Dimenzionalne tolerancije

1.3.5.1. Općenito

Dimenzije u crtežima se trebaju uzimati kao nominalne dimenzije, dok se stvarne dimenzije utvrđuju na čistim površinama reza. Granična odstupanja navedena u *tablicama 1.9 i 1.10* će se primjenjivati na dimenzije bez oznake tolerancija, gdje je napravljena referenca prema ovom međunarodnom standardu ili prema drugim dokumentima.

Tablice su samo primjenjive za plinsko rezanje i rezanje plazmom komada s omjerom duljine i širine koji ne prelazi 4:1.

Za radne komade rezane plinom ili plazmom čiji je omjer duljine i širine veći od 4:1, granična odstupanja trebaju biti definirana od strane proizvođača slijedeći načela koja su navedena u ovom međunarodnom standardu.

Za lasersko rezanje, podržive dimenzionalne tolerancije jako ovise o geometriji radnog komada, kao i o samim prethodnim obradama radnog komada.

Granična odstupanja kvalitete površine reza (tolerancije okomitosti ili kutnosti) su obrađena odvojeno od graničnih odstupanja za dimenzionalne tolerancije radnog komada, sve kako bi se naglasili različiti utjecaji na radni komad.

Definicije za granična odstupanja su bazirane na neovisnim principima opisanim u ISO 8015, prema kojem se dimenzionalne tolerancije, te geometrijske i tolerancije oblika upotrebljavaju neovisno jedna o drugoj. Granična odstupanja ne uključuju odstupanja od okomitosti ili kutnosti.

Tablica 1.9 Granična odstupanja za nominalne dimenzionalne tolerancije – klasa 1 [11]

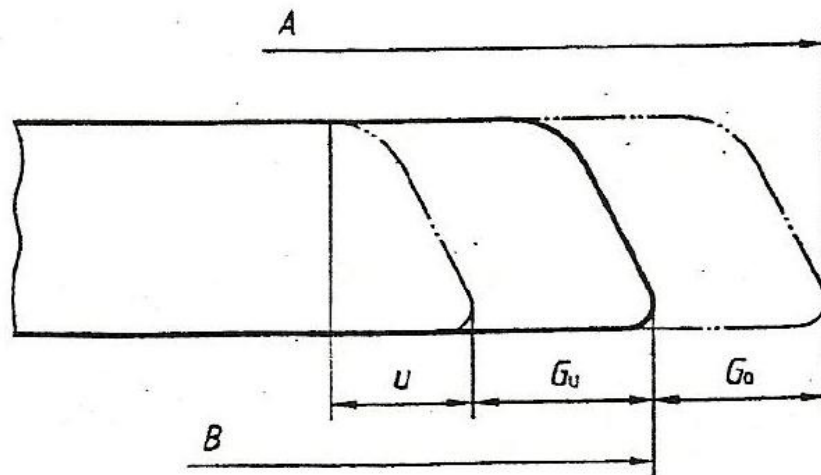
Debljina radnog komada	Nominalne dimenzije							
	$> 0 < 3$	$\geq 3 < 10$	$\geq 10 < 35$	$\geq 35 < 125$	$\geq 125 < 315$	$\geq 315 < 1000$	$\geq 1000 < 2000$	$\geq 2000 < 4000$
	Granična odstupanja							
$> 0 \leq 1$	$\pm 0,04$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$
$> 1 \leq 3,15$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$
$> 3,15 \leq 6,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$
$> 6,3 \leq 10$	-	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$
$> 10 \leq 50$	-	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	± 1	$\pm 1,6$	$\pm 2,5$
$> 50 \leq 100$	-	-	$\pm 1,3$	$\pm 1,3$	$\pm 1,4$	$\pm 1,7$	$\pm 2,2$	$\pm 3,1$
$> 100 \leq 150$	-	-	$\pm 1,9$	± 2	$\pm 2,1$	$\pm 2,3$	$\pm 2,9$	$\pm 3,8$
$> 150 \leq 200$	-	-	$\pm 2,6$	$\pm 2,7$	$\pm 2,7$	± 3	$\pm 3,6$	$\pm 4,5$
$> 200 \leq 250$	-	-	-	-	-	$\pm 3,7$	$\pm 4,2$	$\pm 5,2$
$> 250 \leq 300$	-	-	-	-	-	$\pm 4,4$	$\pm 4,9$	$\pm 5,9$

Tablica 1.10 Granična odstupanja za nominalne dimenzionalne tolerancije – klasa 2 [11]

Debljina radnog komada	Nominalne dimenzije							
	$> 0 < 3$	$\geq 3 < 10$	$\geq 10 < 35$	$\geq 35 < 125$	$\geq 125 < 315$	$\geq 315 < 1000$	$\geq 1000 < 2000$	$\geq 2000 < 4000$
	Granična odstupanja							
$> 0 \leq 1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$
$> 1 \leq 3,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$	± 1	$\pm 1,1$
$> 3,15 \leq 6,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$	$\pm 1,1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,3$	$\pm 1,3$
$> 6,3 \leq 10$	-	± 1	$\pm 1,1$	$\pm 1,3$	$\pm 1,4$	$\pm 1,5$	$\pm 1,6$	$\pm 1,7$
$> 10 \leq 50$	-	$\pm 1,8$	$\pm 1,8$	$\pm 1,8$	$\pm 1,9$	$\pm 2,3$	± 3	$\pm 4,2$
$> 50 \leq 100$	-	-	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,6$	± 3	$\pm 3,7$	$\pm 4,9$
$> 100 \leq 150$	-	-	$\pm 3,2$	$\pm 3,3$	$\pm 3,4$	$\pm 3,7$	$\pm 4,4$	$\pm 5,7$
$> 150 \leq 200$	-	-	± 4	± 4	$\pm 4,1$	$\pm 4,5$	$\pm 5,2$	$\pm 6,4$
$> 200 \leq 250$	-	-	-	-	-	$\pm 5,2$	$\pm 5,9$	$\pm 7,2$
$> 250 \leq 300$	-	-	-	-	-	± 6	$\pm 6,7$	$\pm 7,9$

1.3.5.2. Dimenzionalne tolerancije na dijelovima bez završne obrade

Nominalne dimenzije dijela koji treba izrezati proizlaze iz dimenzija gotovog dijela (dimenzije crteža), reducirane s graničnim odstupanjima (slika 1.22). Stvarne dimenzije dijela dobivene toplinskim rezanjem uvijek odgovaraju najvećim dimenzijama kod vanjskih dimenzija i najmanjim dimenzijama kod unutarnjih dimenzija.



A – nominalna dimenzija gotovog dijela

B – nominalna dimenzija dijela nakon rezanja

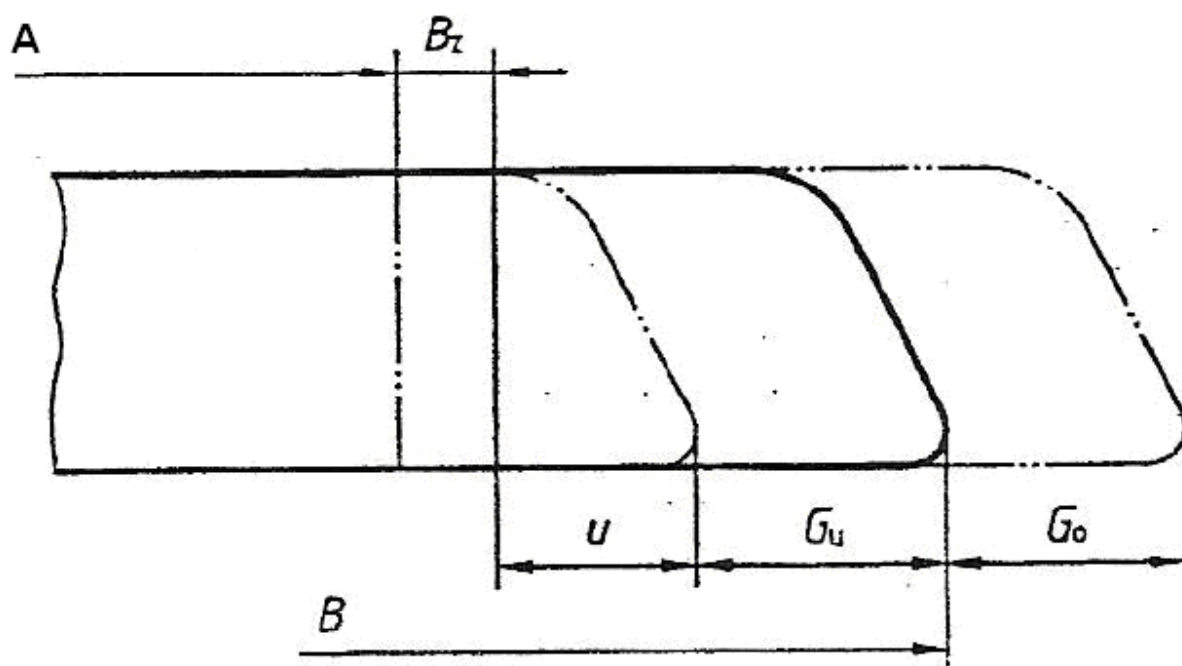
G_o – gornja granica odstupanja

G_u – donja granica odstupanja

Slika 1.22 Dimenzionalne tolerancije dijela bez završne obrade [11]

1.3.5.3. Dimenzionalne tolerancije dijela s završnom obradom

Kako bi bilo moguće održati nominalne dimenzije gotovog dijela, potrebno je, za vanjske dimenzije s dodatkom za završnu obradu B_z , dodati tolerancije okomitosti i kutnosti kao i donju granicu odstupanja, i za unutarnje dimenzije radnog komada s dodatkom za završnu obradu B_z , oduzeti tolerancije okomitosti i kutnosti kao i donju granicu odstupanja (slika 1.23).



A – nominalna dimenzija gotovog dijela

B – nominalna dimenzija dijela nakon rezanja

B_z – dodatak za završnu obradu

G_o – gornja granica odstupanja

G_u – donja granica odstupanja

Slika 1.23 Dimenzionalne tolerancije dijela s završnom obradom [11]

1.3.5.4. Dodatak za završnu obradu

Ako crtež i ne sadrži oznake dodatka za završnu obradu, u praksi se predviđaju dimenzije za taj dodatak u ovisnosti o debljini lima, prema *tablici 1.11*.

Tablica 1.11 Dodatak za završnu obradu [11]

Debljina reza, a	Dodatak za završnu obradu za svaku površinu reza, B _z
$\geq 2 \leq 20$	2
$> 20 \leq 50$	3
$> 50 \leq 80$	5
> 80	7

1.3.6. Informacije u tehničkoj dokumentaciji

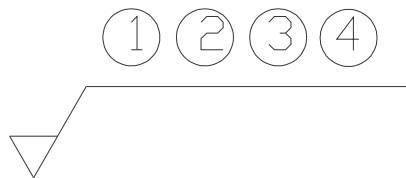
1.3.6.1. Oznake veličina

Dimenzionalne oznake u crtežima se odnose na rezni radni komad. U tehničkoj dokumentaciji, standardima .., trebaju se koristiti dimenzionalni simboli prema ovom međunarodnom standardu.

1.3.7. Oznake kvalitete površine reza i klase tolerancija

1.3.7.1. Oznake na tehničkim crtežima

Označivanje kvalitete i klase tolerancija se trebaju označavati koristeći slijedeće simbole prema ISO 1302:



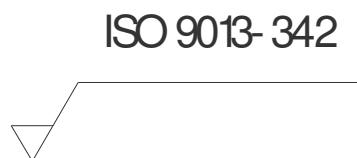
1 – Oznaka glavnog broja ovog međunarodnog standarda

2 – Oznaka tolerancija okomitosti ili kutnosti, u, prema 4.2.1

3 – Oznaka prosječne visine neravnina, Rz5, prema 4.2.2

4 – Oznaka klase tolerancije prema točki 5.

Primjer – Zahtijevane su oznake kvalitete s simbolom 34 (područje 3 za u, područje 4 za Rz5) i granična odstupanja za nominalne dimenzije klase tolerancije 2 (*tablica 1.7*).



2. Eksperimentalni rad

Cilj eksperimentalnog dijela završnog rada je odrediti kvalitetu reza kod plazme i lasera prema normi HRN EN ISO 9013 te usporediti dobivene rezultate. Nakon rezanja ispitnih uzoraka, ispitivati će se slijedeće značajke kvalitete reza: hrapavost površine, tolerancija okomitosti ili kutnosti te širina reza. Cilj je vidjeti promjenu navedenih značajki kvalitete reza s brzinom rezanja, dok su ostali parametri rezanja konstantni.

2.1. Oprema za rezanje

Sustav za plazma rezanje prikazan je na *slici 2.1*, smješten je u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u, u Zagrebu.



Slika 2.1 Prikaz upravljačke jedinice i CNC stola za plazma rezanje

Za rezanje plazmom koristi se izvor za visokoprecizna toplinska rezanja, SPARCIN 900M, proizvođača SPT Plasmatechnik AB. Metali debljine od 1 do 20 mm mogu se rezati sa strujama od 20 to 120A, s intermitencijom 100%. Tanki limovi do 8 mm debljine mogu se rezati vrlo precizno u "high definition" klasi, dok je maksimalna debljina rezanja 28 mm. Plazma sustav koristi tehničke plinove, kisik, dušik, argon, vodik i njihove mješavine, što daje optimalne rezultate kod svih vrsta metala. Također je moguće koristiti zrak. Izvor je konstruiran sa inverterskom tehnologijom i ima jedinstvene mogućnosti integriranja s robotiziranim i vrhunskim cnc sustavima. Upravljanje i

kontrola glavnog luka, pilot luka, napona luka i struje rezanja izvodi se automatski, što omogućuje održavanje konstantne kvalitete reza.

Tehničke karakteristike plazma izvora, SPARCIN 900M, navedene su u *tablici 2.1*.

Tablica 2.1 Tehnički podaci plazme SPARCIN 900M

TEHNIČKI PODACI	SPARCIN 900M
Napajanje	3~50 Hz; 400V
Osigurač	16 A spori
Nazivna snaga	12 kVA
Raspon regulacije struje rezanja	120 V; 20 - 120 A
Intermitencija:	100%
Napon praznog hoda	200 V
Klasa zaštite	IP 22
Hlađenje	Voda
Klasa izolacije	F
Dimenzije DxŠxV	550x360x920 mm
Masa	28 kg

Za drugi dio eksperimentalnog dijela, korišten je CO₂ laser, TRUMPF 3020, firme Pro d.o.o. (*slika 2.2*).



Slika 2.2 Sustav za rezanje laserom

Pri rezanju koriste se plinovi CO₂, He i N₂. Mogu se rezati nehrđajući čelici debljina do 20 mm, koristi se i za rezanje ugljičnih čelika, kao i za rezanje aluminija debljina do 8 mm. S optimalnim parametrima moguće je dobiti rezove visoke kvalitete.

Tehničke karakteristike lasera TRUMPF 3020 prikazane su u *tablici 2.2*.

Tablica 2.2 Tehnički podaci lasera TRUMPF 3020

Radno područje	X – os	3000 mm
	Y – os	1500 mm
	Z – os	115 mm
Max. težina radnog komada	710 kg	
Dimenzije (DxŠxV)	9200x4600x2000	
Masa stroja	10 500 kg	
CNC kontrola putanje	Sinumerik 840D	
Valna duljina	10,6 μm	
Struktura snopa	TEM ₀₀	
Nominalna snaga	3200 W	

2.2. Materijal

Pokusi su izvedeni na aluminiju čistoće 99,7 (Al 99,7 – oznaka prema DIN – u). Debljina svih ispitnih uzoraka, i za plazmu i za laser, iznosila je 3 mm. Prema spomenutoj normi u *tablici 2.3* naveden je kemijski sastav aluminijske legure, korištene u eksperimentu.

Tablica 2.3 Kemijski sastav Al 99,7

DIN	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	V	Ostali
%	0,2	0,25	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03

2.3. Određivanje kvalitete reza – plazma

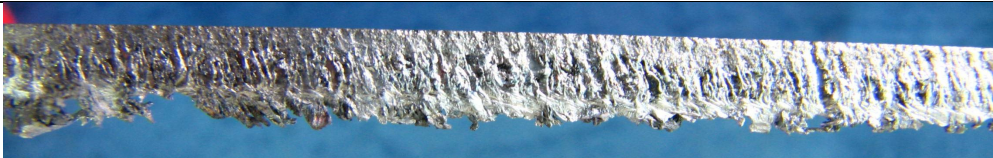


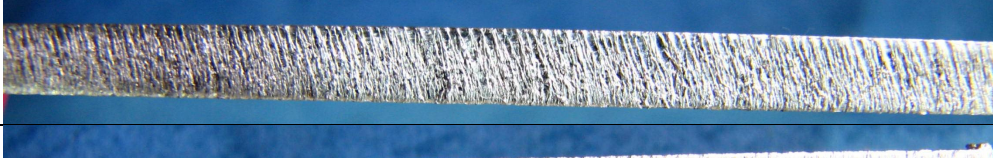

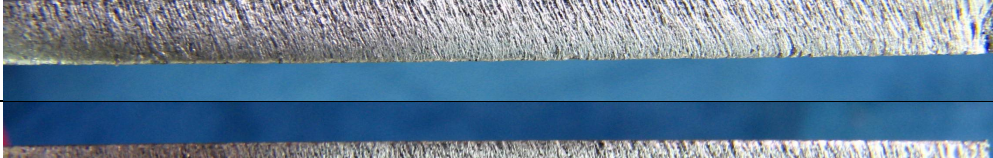

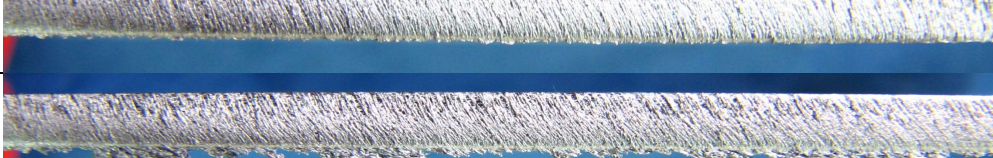
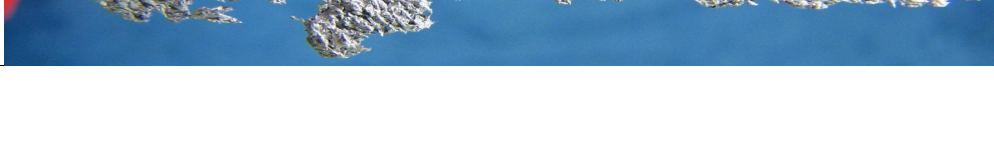
Kako je već navedeno u eksperimentu se uspoređuje kvaliteta rezanja aluminija laserom i plazmom. Korišteni parametri i režimi obrade za plazmu su prikazani u *tablici 2.4*. Uzorci su izrezani različitim brzinama, kako bi se vidio utjecaj promjene brzine rezanja na značajke kvalitete reza (hrapavost površine, tolerancija okomitosti ili kutnosti, širina reza), dok su ostali parametri procesa konstantni.

Tablica 2.4 Parametri rezanja aluminija plazmom

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Udaljenost od sapnice (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)
1.	Zrak	0,9	1	3	45	3
2.			1,5			
3.			2			
4.			2,5			
5.			3			
6.			3,5			
7.			4			
8.			4,5			
9.			5			

U *tablici 2.5* prikazani su izrezani uzorci u smjeru rezanja. Prikaz je dat, kako bi se već na početku eksperimenta vidio utjecaj promjene brzine rezanja na dobivenu površinu reza.

Tablica 2.5 Izgled reza kod plazme u ovisnosti o brzini rezanja

		Slike uzoraka nakon rezanja (u smjeru rezanja)
Uzorak	v (m/min)	Konstantni parametri: plin – zrak, promjer sapnice – 0,9 mm, udaljenost sapnice od lima – 3 mm, struja rezanja – 45 A, tlak plina – 3 bar.
1.	1	
2.	1,5	
3.	2	
4.	2,5	
5.	3	
6.	3,5	
7.	4	
8.	4,5	
9.	5	

Na slikama u *tablici 2.5* vide se uzorci nakon rezanja, kao i pripadajuće brzine rezanja. Iz samih slika se vidi da premala ili prevelika brzina rezanja ima za rezultat jako lošu kvalitetu reza. Srh koji nastaje kao produkt prevelike brzine rezanja teško je ukloniti, te zahtijeva naknadno brušenje. Ako je brzina rezanja prevelika može doći i do toga da plazma ne penetrira potpuno kroz materijal. Ako je brzina rezanja premala, širina reza će biti veća, a rastaljeni materijal neće biti ispuhan plinom nego će se nakupljati na dnu reza kao srh koji je lako ukloniti za razliku od srha koji nastaje kod prevelike brzine rezanja.

2.3.1. Mjerenje hrapavosti površine

Tehničke površine nisu idealno glatke geometrijske plohe koje razdvajaju dva medija, već su to, mikroskopski gledano, hrapave plohe karakterizirane nizom neravnina različitih veličina, oblika i rasporeda. Posljedica tome su različite tehnologije obrade materijala. Veličina hrapavosti može utjecati na:

- smanjenje dinamičke izdržljivosti (odnosno, smanjenje čvrstoće oblika)
- pojačano trenje i habanje tribološki opterećenih površina
- ubrzavanje korozije.

Mjerenje hrapavosti plazma uzoraka izvršeno je u Laboratoriju za alatne strojeve (FSB), i to samo na nekim uzorcima. Mjerenje nije bilo moguće izvesti na uzorcima izrezanima s malom ili prevelikom brzinom rezanja (gruba površina, pojava srha), zbog osjetljivosti ticala i mogućeg oštećenja prijenosnog uređaja za mjerenje hrapavosti. Hrapavost površine se prema normi HRN EN ISO 9013 mjeri svako 15 mm duljine reza, i to u smjeru rezanja. Svi izrezani uzorci aluminija su debljine 3 mm. S obzirom na dimenzije uzoraka izvršena su po četiri mjerenja na svakom uzorku. Osim veličine R_z – prosječna visina neravnina, koja je definirana u gore navedenoj normi, pomoću prijenosnog uređaja Mitutoyo SJ-201 (*slika 2.3*) izmjerene su i slijedeće veličine:

- R_a – srednji iznos hrapavosti,
- R_y – maksimalna visina profila,
- R_q – odstupanje srednjeg korjena profila.



Slika 2.3 Prijenosni uređaj Mitutoyo SJ-201 za mjerenje hrapavosti

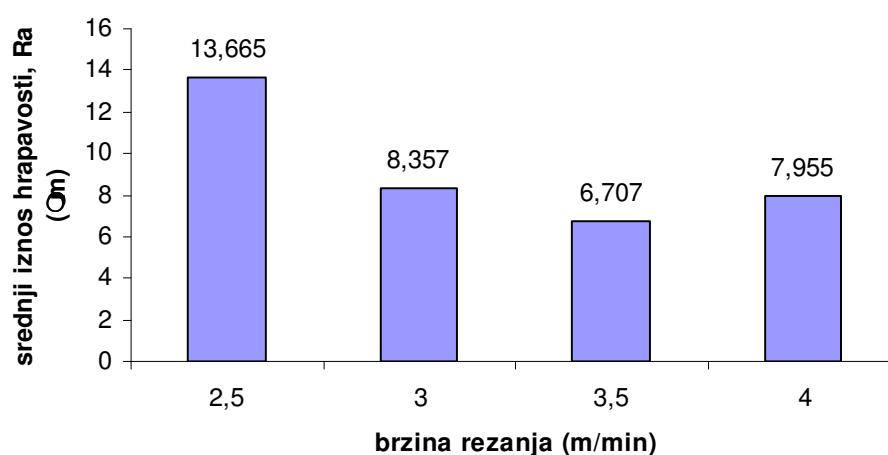
U *tablici 2.6* prikazani su rezultati mjerenja hrapavosti svakog uzorka posebno, a zatim je određena klasa hrapavosti uzoraka prema normi HRN EN ISO 9013.

Tablica 2.6 Izmjerene vrijednosti hrapavosti plazma uzoraka

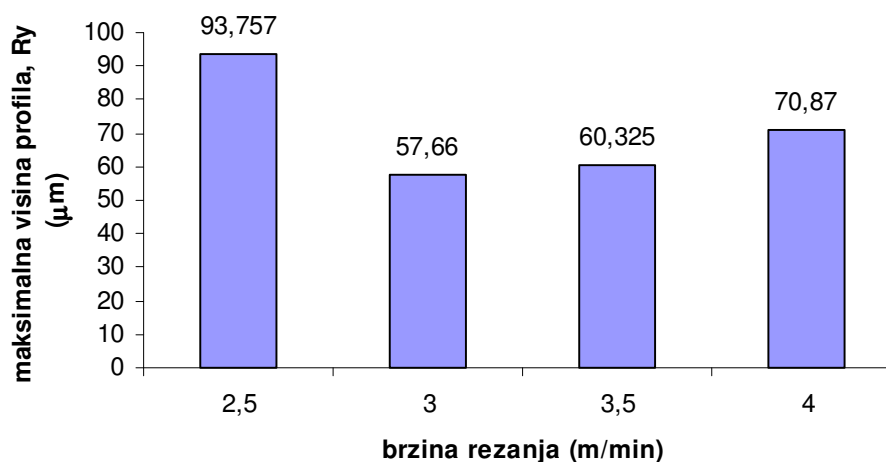
(osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

Uzorak 4 (brzina rezanja=2,5 m/min)					
Izvršena mjerenja					
Veličine hrapavosti (μm)	1.	2.	3.	4.	Srednje vrijednosti, Δ (μm)
Ra	11,52	10,47	16,18	16,49	13,665
Ry	77,28	69,06	99,69	129	93,757
Rz	61,89	53,57	83,42	81,75	70,157
Rq	14,44	12,82	20,07	20,24	16,893
Uzorak 5 (brzina rezanja=3 m/min)					
Izvršena mjerenja					
Veličine hrapavosti (μm)	1.	2.	3.	4.	Srednje vrijednosti, Δ (μm)
Ra	7,53	9,31	8,44	8,15	8,357
Ry	55,24	63,93	65,13	46,34	57,660
Rz	38,28	49,06	45,59	39,70	43,157
Rq	9,36	11,73	10,52	10,04	10,413
Uzorak 6 (brzina rezanja=3,5 m/min)					
Izvršena mjerenja					
Veličine hrapavosti (μm)	1.	2.	3.	4.	Srednje vrijednosti, Δ (μm)
Ra	6,52	5,76	8,29	6,26	6,707
Ry	68,91	48,66	70,21	53,52	60,325
Rz	41,00	36,47	46,61	36,7	40,195
Rq	8,52	7,51	10,8	8,09	8,73
Uzorak 7 (brzina rezanja=4 m/min)					
Izvršena mjerenja					
Veličine hrapavosti (μm)	1.	2.	3.	4.	Srednje vrijednosti, Δ (μm)
Ra	6,87	6,14	9,01	9,80	7,955
Ry	60,35	70,86	70,61	81,66	70,870
Rz	43,74	39,93	49,77	50,44	45,97
Rq	9,08	8,22	11,69	12,37	10,34

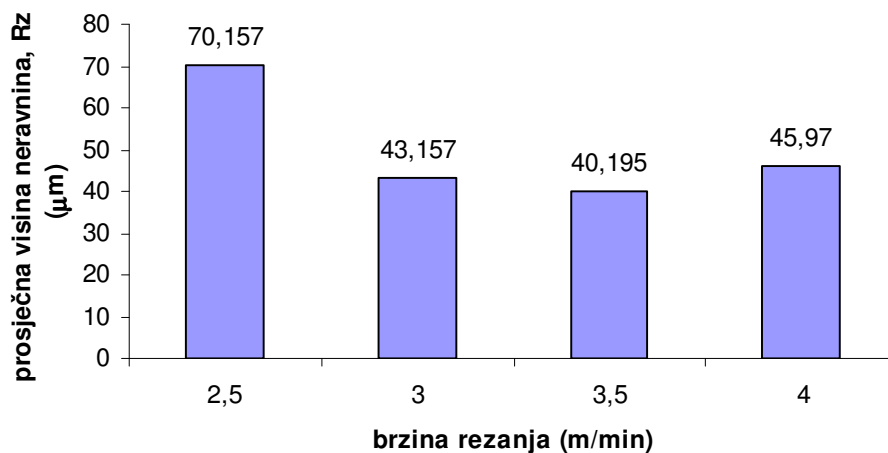
Nadalje prema normi HRN EN ISO 9013 klasificirana je hrapavost površine, odnosno prosječna visina neravnina - Rz. Prema *tablici 1.8* i *slici 1.21* određena je klasa hrapavosti pojedinih uzoraka. U spomenutoj tablici nalaze se rasponi veličine Rz za pojedinu klasu hrapavosti, tako npr. da bi se postigla druga klasa hrapavosti potrebne su vrijednosti $40 + (0,8a \text{ mm})$ u μm , gdje je a debljina lima. Dok su na *slici 1.21* prikazane klase hrapavosti u ovisnosti o dobivenim vrijednostima i debljini radnog komada. Iz datih prosječnih rezultata veličine Rz, vidljivo je da uz optimalne parametre rezanja možemo najviše postići drugu klasu ili područje hrapavosti. U tu klasu spadaju uzorci 5, 6 i 7, dok uzorak 4 ima najveću vrijednost Rz te prema spomenutoj normi spada u treću klasu veličine hrapavosti Rz. Što se tiče svih veličina hrapavosti, kao i spomenute, klasificirane veličine Rz najbolja hrapavost je dobijena na uzorku 6, s brzinom rezanja 3,5 m/min. Tokom eksperimenta s povećanjem ili smanjenjem brzine dobijale su se sve grublje površine i površine s određenom količinom srha (potrebna naknadna obrada). Na slijedećim slikama, 2.4 do 2.7 prikazane su vrijednosti veličina hrapavosti pojedinih uzoraka te njihovo mijenjanje u ovisnosti o brzini rezanja.



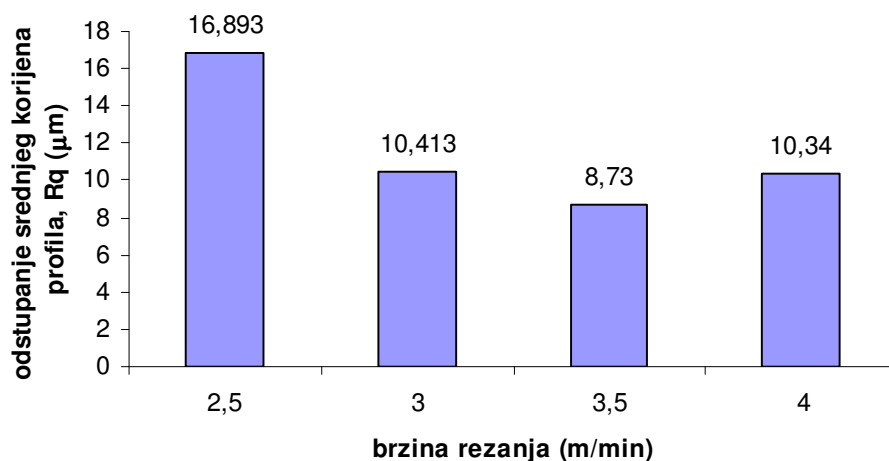
Slika 2.4 Prikaz ovisnosti srednjeg iznos hrapavosti o brzini rezanja



Slika 2.5 Prikaz ovisnosti maksimalne visine profila o brzini rezanja



Slika 2.6 Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja

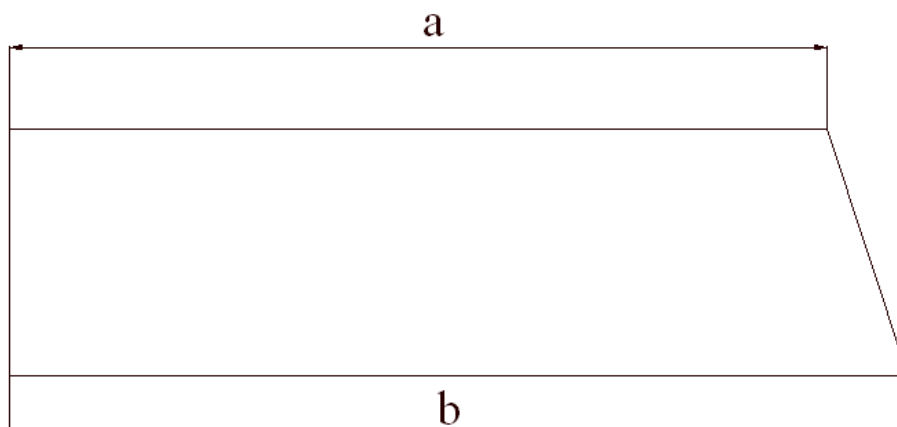


Slika 2.7 Prikaz ovisnosti odstupanja srednjeg korijena profila o brzini rezanja

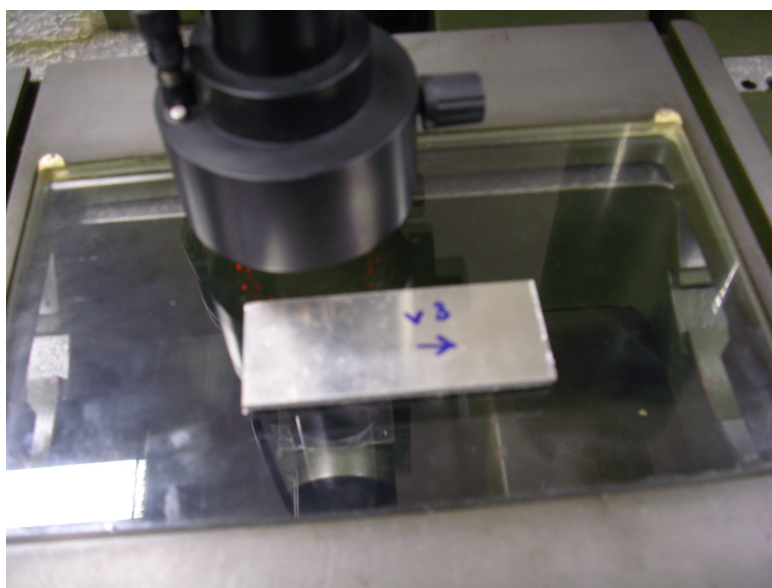
2.3.2. Mjerenje tolerancija kutnosti ili okomitosti

Druga važna značajka kvalitete reza je nagib (kut površine reza). Ako je nagib reza od gornje do donje površine radnog materijala točno pod 90° , tad je nagib reza jednak nuli. Udaljenost sapnice može znatno utjecati na nagib reza, manja udaljenost znači i manji nagib reza. Isto tako smanjivanjem brzine rezanja može se također smanjiti nagib reza. Mjerenje je izvršeno u LFSB-u (Laboratorij za precizna mjerenja dužina) na alatnom mikroskopu uz pomoć softvera RLS MerOpt. Mjerenje je izvršeno na sedam ispitnih uzoraka, a na uzorcima 1 i 9 nije zbog prisutnosti srha na donjoj površini reza. Mjerenje je izvršeno na način da se prvo mjerila udaljenost između gornjih površina reza uzorka, te se nakon toga isti postupak obavio i za donju površinu reza (slika 2.9). Za svaku udaljenost i površinu reza odabrano je po tri točke, svakih 20 mm u smjeru rezanja, kako je

navedeno u normi HRN EN ISO 9013, te se uz pomoć softwera RLS MerOpt dobila srednja vrijednost udaljenosti površina. Tolerancija kutnosti ili okomitosti je dobivena tako da se udaljenost donje površine reza oduzela od udaljenosti gornje površine reza, $b - a$ (slika 2.8).



Slika 2.8 Kvalitativni prikaz udaljenosti mjernih površina

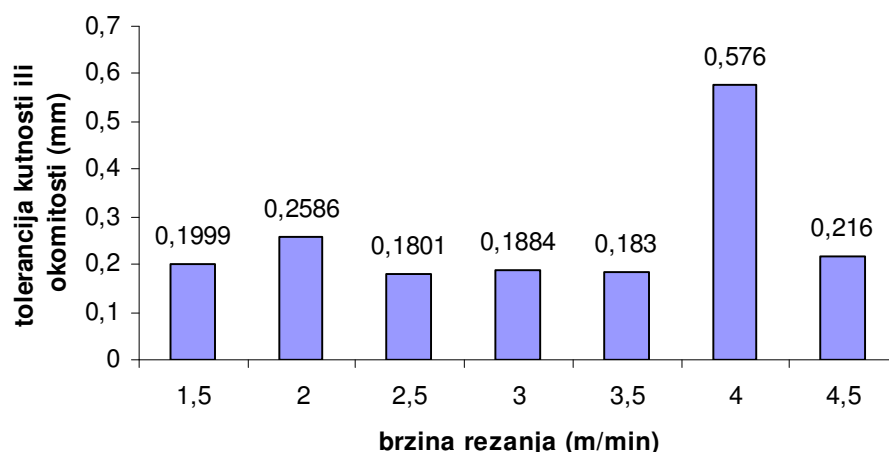


Slika 2.9 Mjerenje dimenzija a i b na alatnom mikroskopu

Tablica 2.7 Dobivene vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti plazma uzoraka

Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Donja površina reza b (mm)	Gornja površina reza a (mm)	Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)
2.	1,5	43,4817	43,2818	0,1999
3.	2	42,7386	42,4800	0,2586
4.	2,5	40,5745	40,3944	0,1801
5.	3	32,7346	32,5462	0,1884
6.	3,5	43,0689	42,8859	0,1830
7.	4	40,6265	40,0505	0,5760
8.	4,5	42,2885	42,0725	0,2160

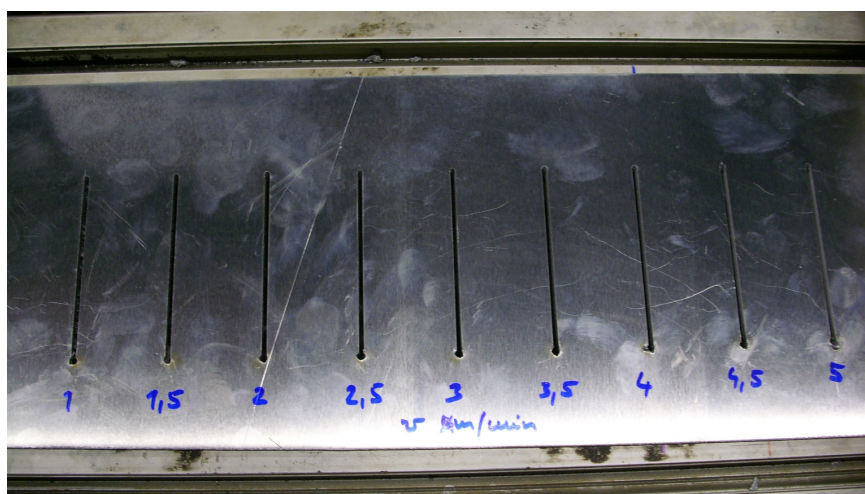
Nadalje, dobivene vrijednosti tolerancija kutnosti ili okomitosti treba svrstati u određenu klasu prema normi HRN EN ISO 9013. Prema *tablici 1.7* i *slici 1.20* u kojima se nalaze rasponi odstupanja kutnosti ili okomitosti, svi uzorci osim uzorka 7 spadaju u drugu klasu tolerancije kutnosti ili okomitosti, što nam govori da su izrezani uzorci zadovoljavajući što se tiče te tolerancije. Odnosno, uzorci koji pripadaju drugoj klasi imaju vrijednosti tolerancija kutnosti veće od $0,15 + 0,007a$ u mm, a manje od $0,4 + 0,01a$ u mm, gdje je a – debljina radnog komada. Zbog zakrivljenosti gornjeg ruba reza uzorak broj 7 (brzina rezanja 4 m/min) ima malo veće odstupanje, te spada u treću klasu tolerancije kutnosti ili okomitosti. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da se uz optimalne parametre dobiju najmanja odstupanja. Na *slici 2.10* prikazana je promjena tolerancije kutnosti ili okomitosti u ovisnosti o brzini rezanja.



Slika 2.10 Prikaz ovisnosti tolerancija kutnosti ili okomitosti o brzini rezanja

2.3.3. Mjerenje širine reza

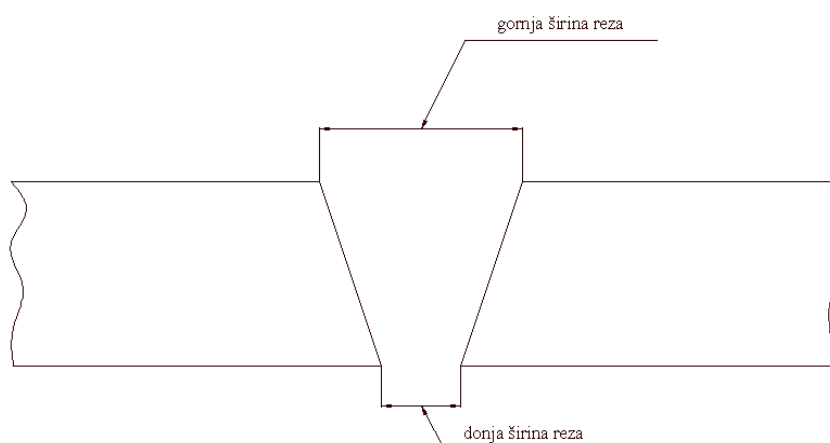
Osnovno svojstvo reza je njegova širina, odnosno količina metala koja je uklonjena mlazom plazme. Širina reza je bitna kod rezanja radnog materijala na tražene dimenzije. Iako širina reza nije obrađena prema normi HRN EN ISO 9013, u eksperimentu su napravljeni ispitni uzorci (*slika 2.11*) uz pomoć kojih je izračunata širina reza. Mjerenje širine reza također je napravljeno u LFSB-u pomoću alatnog mikroskopa i softvera RLS MerOpt, te izrezanog ispitnog uzorka u Laboratoriju za zavarivanje (*slika 2.12*). Mjerenje je izvršeno na način da se za svaku brzinu rezanja, odnosno svaki uzorak uzelo po tri točke s obje strane površine reza te se na taj način dobila razlika u širini reza, gornje i donje površine (*slika 2.13*). S tim da treba napomenuti da se donja širina reza mjerila samo na uzorcima bez srha na donjoj površini reza (premala ili prevelika brzina rezanja). Dobivene vrijednosti su aproksimirane uz pomoć spomenutog softvera te su se dobile određene vrijednosti širine reza (*tablica 2.8*).



Slika 2.11 Izrezani plazma ispitni uzorak za mjerenje širine reza



Slika 2.12 Alatni mikroskop LFSB-a i plazma izrezani ispitni uzorak



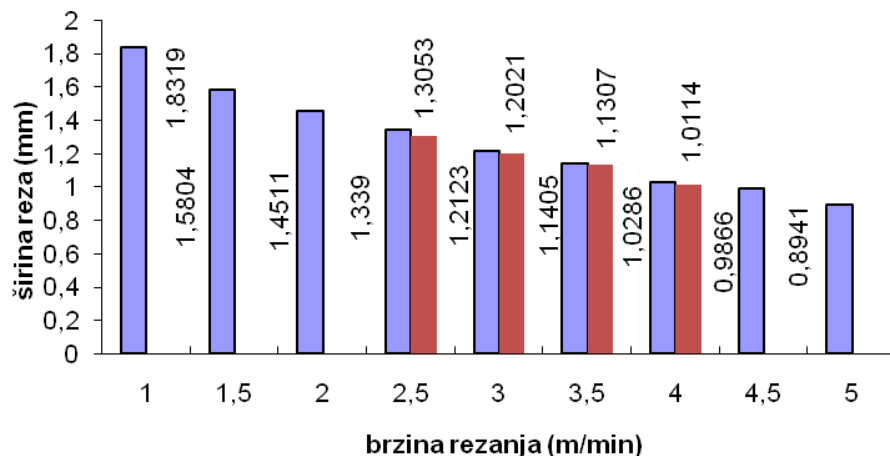
Slika 2.13 Kvalitativni prikaz širine reza

Tablica 2.8 Dobivene vrijednosti širine reza plazma uzoraka

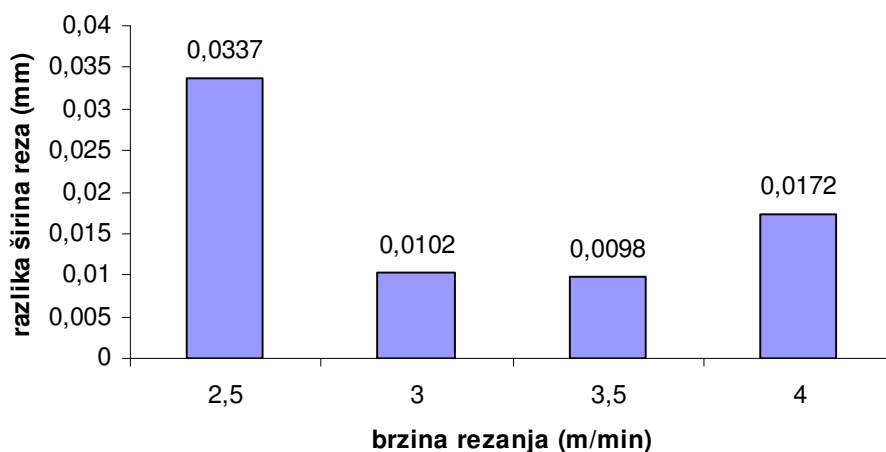
(* - pojava srha)

Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Gornja širina reza (mm)	Donja širina reza (mm)	Razlika širina reza (mm)
1.	1	1,8319	*	-
2.	1,5	1,5804	*	-
3.	2	1,4511	*	-
4.	2,5	1,3390	1,3053	0,0337
5.	3	1,2123	1,2021	0,0102
6.	3,5	1,1405	1,1307	0,0098
7.	4	1,0286	1,0114	0,0172
8.	4,5	0,9886	*	-
9.	5	0,8941	*	-

Prikaz ovisnosti širina reza, te razlika izmjerenih širina reza o različitim brzinama rezanja prikazan je na slikama 2.14 i 2.15.



Slika 2.14 Prikaz ovisnosti širina reza o brzini rezanja





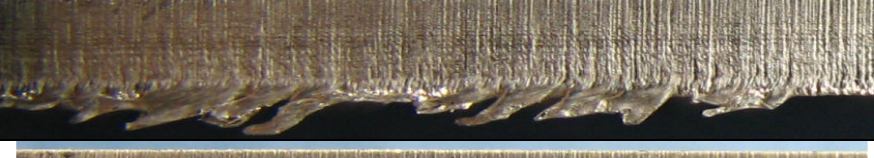


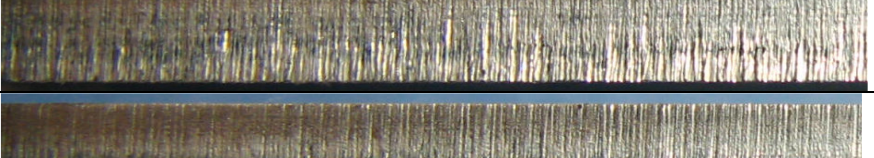
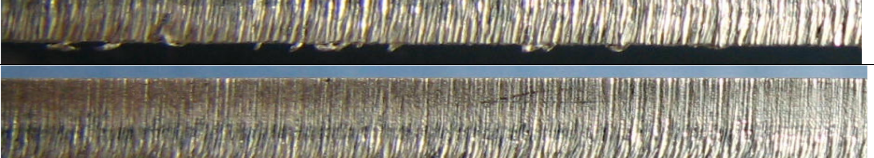
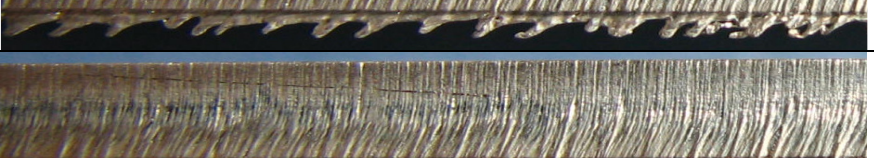
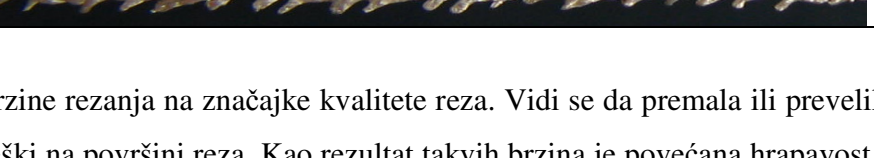
Slika 2.15 Prikaz razlika širina reza u ovisnosti o brzini rezanja

Iz dobivenih rezultata širina reza, kao i iz prikaza ovisnosti izmjerenih širina reza o brzini rezanja, zaključuje se da su širina reza i brzina rezanja obrnuto proporcionalne veličine. Razlike između najmanje (1 m/min) i najveće (5 m/min) brzine rezanja, uzrokuju dvostruku veću širinu reza najmanje brzine rezanja. Uzorci izrezani s brzinama rezanja 3 i 3,5 m/min pokazuju najmanje odstupanje između gornje i donje širine reza, što je jako dobro, jer takvi uzorci uglavnom ne zahtijevaju naknadnu obradu. Povećanjem ili smanjenjem brzina od optimalne brzine rezanja (3,5 m/min) dobivene su sve veće razlike između gornje i donje širine reza.

2.4. Određivanje kvalitete reza – laser

Drugi dio eksperimenta odnosi se na rezanje aluminijskog lima laserom. Uzorci su izrezani u firmi Pro d.o.o. Kao i kod plazma uzoraka, rezao se aluminijski lim debljine 3 mm, i samo se mijenjao parametar brzine rezanja. Ispitivati će se iste značajke kao i kod plazma uzoraka, dakle, hrapavost površine, tolerancija kutnosti ili okomitosti te širina reza. Cilj je vidjeti mijenjanje ovih značajki promjenom brzine rezanja, sve kako bi se odabrali optimalni parametri rezanja laserom te odgovarajuće klase kvalitete reza. Za razliku od plazma rezanja ovdje se išlo s većim korakom od optimalne brzine iz tablica navedenog stroja, koja iznosi 3,5 m/min. Izrezano je isto kao i kod plazme, 9 uzoraka, s različitim brzinama rezanja i odstupanjima od po 0,7 m/min od optimalne vrijednosti brzine rezanja (*tablica 2.9*).

Tablica 2.9 Izgled reza kod lasera u ovisnosti o brzini rezanja

Uzorak	v (m/min)	Slike uzoraka nakon rezanja (u smjeru rezanja)	
		Konstantni parametri: snaga lasera – 3200 W, udaljenost sapnice od lima – 1 mm, promjer sapnice – 1,7 mm, tlak plina (N ₂) – 12 bar.	
1.	0,7		
2.	1,4		
3.	2,1		
4.	2,8		
5.	3,5		
6.	4,2		
7.	4,9		
8.	5,6		
9.	6,3		

Na slikama se vidi utjecaj brzine rezanja na značajke kvalitete reza. Vidi se da premala ili prevelika brzina rezanja dovodi do greški na površini reza. Kao rezultat takvih brzina je povećana hrapavost te

pojava srha na donjem rubu reza. Na uzorcima izrezanim s prevelikom brzinom rezanja pojavljuje se preveliki zaostatak utora u donjem dijelu, pojedinačna udubljenja i izostanak procesa rezanja. Uzorci izrezani s optimalnim parametrima daju dobru kvalitetu reza, te se na njima ne javljaju gore spomenute greške.

2.4.1. Mjerenje hrapavosti površine

Mjerenje hrapavosti površine uzoraka izrezanih laserom također je izvršeno u Laboratoriju za alatne strojeve uz pomoć prijenosnog uređaja Mitutoyo SJ-201. Mjerenje je izvršeno na četiri uzorka, odnosno samo na onim uzorcima na kojima se nisu javile greške(najčešća pojava srha), i to zbog osjetljivosti ticala uređaja i zbog nemogućnosti dobijanja optimalnih parametara rezanja. Uz pomoć ovog uređaja izmjereno je osim R_z – prosječna visina neravnina (jedina definirana u normi HRN EN ISO 9013) i vrijednosti R_a (srednji iznos hrapavosti), R_y (maksimalna visina profila), R_q (odstupanje srednjeg korijena profila). Napravljena su po četiri mjerenja za svaku vrijednost, i to u smjeru rezanja kako je definirano u spomenutoj normi (slika 2.16). U tablici 2.10 prikazani su dobiveni rezultati te srednja vrijednost svake veličine hrapavosti, pomoću koje će se odrediti pripadajuća klasa hrapavosti.



Slika 2.16 Prikaz mjerenja hrapavosti laserskih uzoraka

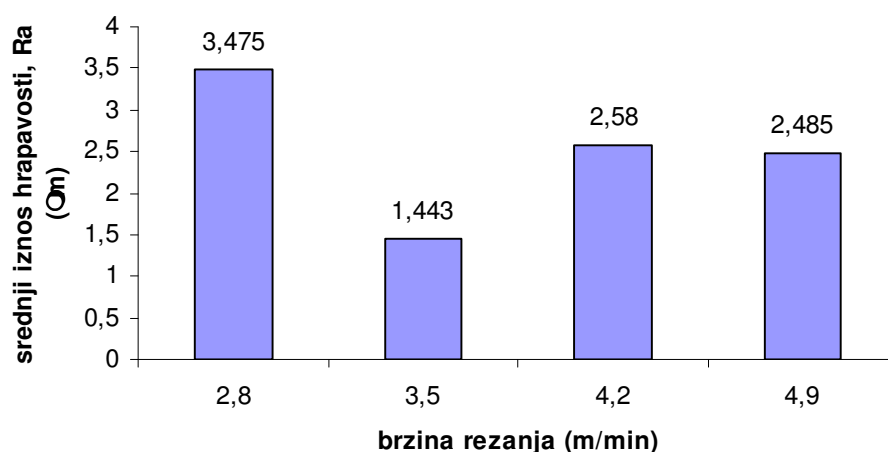
Tablica 2.10 Izmjerene vrijednosti hrapavosti laserskih uzoraka

(osjenčano – veličina hrapavosti klasificirana prema normi HRN EN ISO 9013)

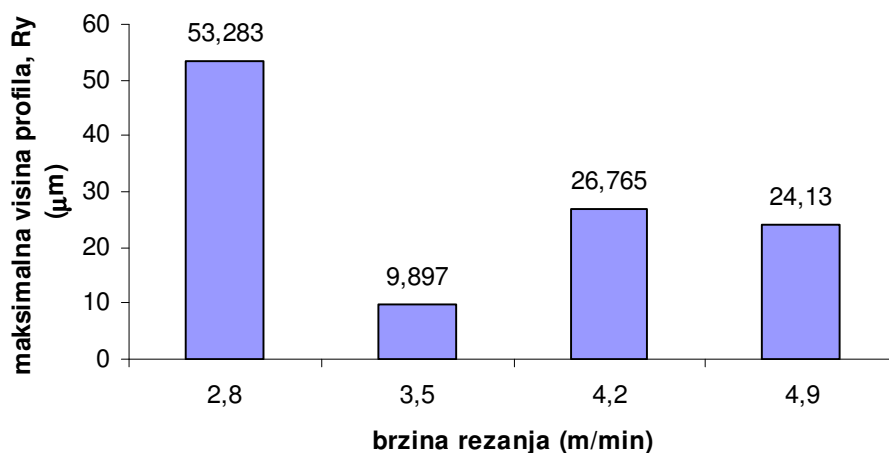
Uzorak 4 (brzina rezanja=2,8 m/min)					
Izvršena mjerenja					
Veličine hrapavosti (μm)	1.	2.	3.	4.	Srednje vrijednosti, Δ (μm)
Ra	3,72	3,04	3,52	3,62	3,475
Ry	55,16	53,40	54,72	49,85	53,283
Rz	20,51	17,21	19,81	19,93	19,365
Rq	4,81	3,91	4,50	4,56	4,445
Uzorak 5 (brzina rezanja=3,5 m/min)					
Izvršena mjerenja					
Veličine hrapavosti (μm)	1.	2.	3.	4.	Srednje vrijednosti, Δ (μm)
Ra	1,77	1,23	1,44	1,33	1,443
Ry	12,61	10,06	9,25	7,67	9,897
Rz	10,54	7,37	8,39	6,93	8,307
Rq	2,24	1,54	1,83	1,60	1,803
Uzorak 6 (brzina rezanja=4,2 m/min)					
Izvršena mjerenja					
Veličine hrapavosti (μm)	1.	2.	3.	4.	Srednje vrijednosti, Δ (μm)
Ra	2,44	1,99	2,18	3,71	2,580
Ry	20,75	18,26	15,36	52,69	26,765
Rz	15,45	12,11	13,60	20,46	15,405
Rq	3,08	2,54	2,76	4,67	3,263
Uzorak 7 (brzina rezanja=4,9 m/min)					
Izvršena mjerenja					
Veličine hrapavosti (μm)	1.	2.	3.	4.	Srednje vrijednosti, Δ (μm)
Ra	2,28	1,66	2,46	3,54	2,485
Ry	21,24	10,66	22,24	42,38	24,130
Rz	15,09	8,77	15,32	21,04	15,055
Rq	2,98	1,99	3,17	4,51	3,163

Nakon izračunatih srednjih vrijednosti veličina hrapavosti slijedi klasificiranje veličine Rz u odgovarajuću klasu hrapavosti prema normi HRN EN ISO 9013. Prema *tablici 1.8* i *slici 1.21* vidljivo je da sva četiri uzorka spadaju u prvu klasu ili prvo područje hrapavosti. Već sada se da zaključiti da se prva klasa hrapavosti može postići jedino laserskim rezanjem, dok se ostalim

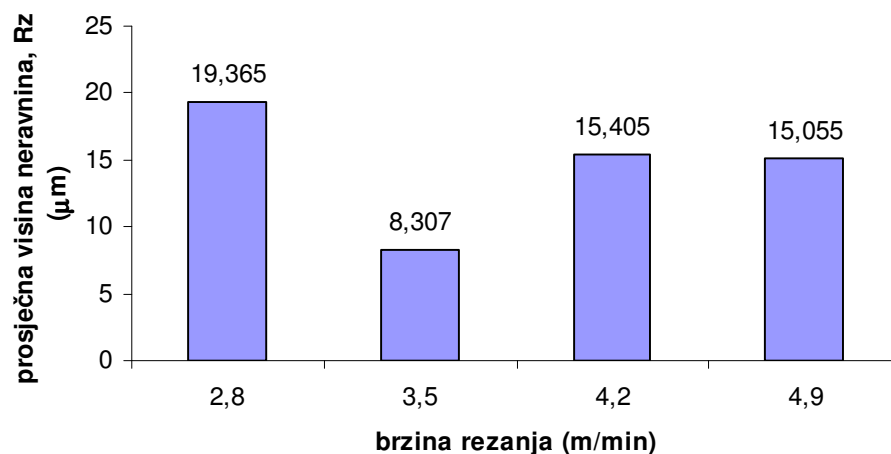
postupcima rezanja (plazma i plinsko) može postići najviše druga klasa hrapavosti. Najoptimalniji uzorak pokazao se onaj izrezan s brzinom rezanja od 3,5 m/min, njime su postignuti jako dobri rezultati hrapavosti, skoro dva puta bolja (manja) vrijednost prosječne visine neravnina Rz od preostala tri mjerena uzorka. Isto tako, brzinom rezanja od 3,5 m/min dobiveni su i najbolji rezultati što se tiče preostale tri veličine hrapavosti Ra, Ry i Rq. Na *slikama 2.17 do 2.20* dat je prikaz ovisnosti pojedinih veličina hrapavosti o brzini rezanja.



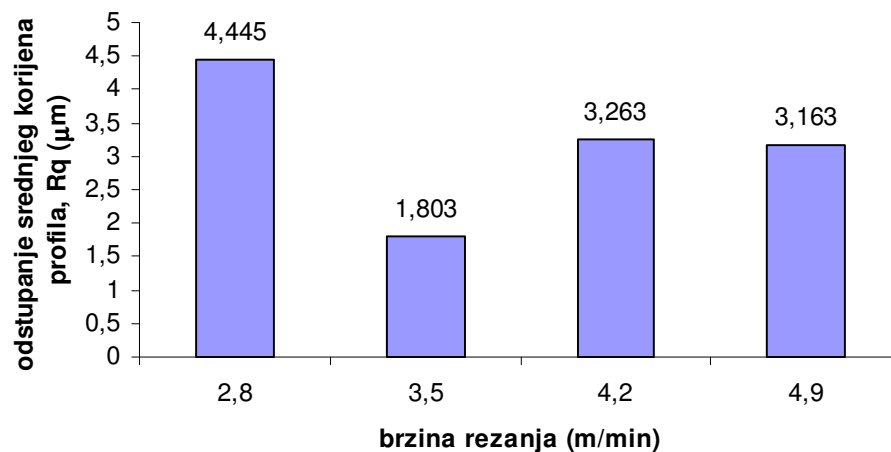
Slika 2.17 Prikaz ovisnosti srednjeg iznosa hrapavosti o brzini rezanja



Slika 2.18 Prikaz ovisnosti maksimalne visine profila o brzini rezanja



Slika 2.19 Prikaz ovisnosti prosječne visine neravnina o brzini rezanja



Slika 2.20 Prikaz ovisnosti odstupanja srednjeg korijena profila o brzini rezanja

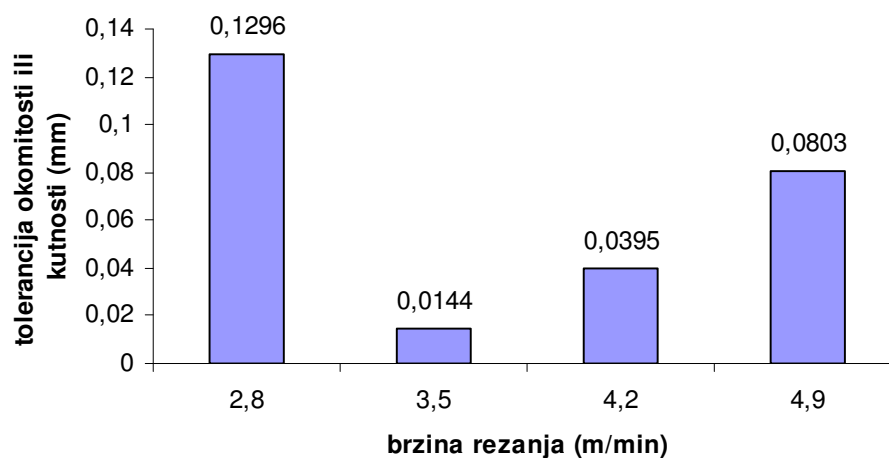
2.4.2. Mjerenje tolerancija okomitosti ili kutnosti

Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti izvršeno je u LFSB-u, pomoću alatnog mikroskopa s kojim je izmjerena i širina reza. Vrijednosti dobivene ovim mjerenjima treba uzeti s rezervom zbog nedostatka uređaja namijenjenog za mjerenje ove tolerancije. Mjerenja su izvršena na taj način da se prvo računala udaljenost gornjih površina reza određenog uzorka, a zatim se to isto radilo i za donju površinu reza (uzorak se okrenuo, mijenjale su se samo tri točke na donjoj površini, dok je suprotna strana imala iste, već odabrane točke). Odabirale su se po tri točke za svaku površinu reza, i to svako 20 mm u smjeru rezanja, kako je navedeno u normi. Uz pomoć softvera RLS MerOpt dobivena je srednja vrijednost udaljenosti pojedinih površina te se njihovim oduzimanjem jedne od druge dobije veličina tolerancije kutnosti ili okomitosti (*tablica 2.11*). Mjerenje je izvršeno na sva četiri uzorka na kojima se mjerila i hrapavost. Na ostalim uzorcima nije bilo moguće mjeriti toleranciju kutnosti ili okomitosti zbog pojave srha na jednoj od površina reza.

Tablica 2.11 Dobivene vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti laserskih uzoraka

Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Donja površina reza b (mm)	Gornja površina reza a (mm)	Tolerancija kutnosti ili okomitosti (mm)
4.	2,8	39,9047	39,7751	0,1296
5.	3,5	39,7786	39,7642	0,0144
6.	4,2	39,6361	39,5966	0,0395
7.	4,9	39,7026	39,6223	0,0803

Nadalje, uz pomoć dobivenih rezultata treba odrediti pojedinu klasu ili područje tolerancije okomitosti ili kutnosti prema normi HRN EN ISO 9013. Pomoću *tablice 1.7* i *slike 1.20* je vidljivo da sva četiri uzorka pripadaju prvoj klasi tolerancije okomitosti. Najveće odstupanje ima uzorak 4 koji je jako blizu drugoj klasi, zbog toga što je to „granični“ uzorak na kojem se u početku samog reza pojavio srh koji je utjecao na dobivene rezultate. Ostala tri uzorka pokazuju jako mala odstupanja od okomitosti, što je uostalom i karakteristika samog laserskog rezanja. S time da je bitno napomenuti, da se kao i kod hrapavosti uzorak 5 (brzina rezanja 3,5 m/min) pokazao najbolji što se tiče tolerancije okomitosti. Prikaz ovisnosti tolerancija kutnosti ili okomitosti o brzini rezanja dat je na *slici 2.21*.



Slika 2.21 Prikaz ovisnosti tolerancija okomitosti ili kutnosti o brzini rezanja

2.4.3. Mjerenje širine reza

Mjerenje širine reza također je izvršeno u LFSB-u, pomoću alatnog mikroskopa i softwera RLS MerOpt. Mjerenje je izvršeno na isti način kao i kod plazme ispitnog uzorka (*slika 2.22*), odnosno i za gornju i za donju širinu reza uzimane su po tri točke sa svake strane površine reza te su se nakon toga uz pomoć softwera te vrijednosti aproksimirale, kako bi se dobila konačna vrijednost širine reza za pojedinu brzinu rezanja. Bitno je napomenuti da se donja širina reza i kod laserskog ispitnog uzorka, mjerila samo za brzine kod kojih nije bilo pojave srha. Konačne dobivene vrijednosti širine reza prikazane su u *tablici 2.12*.



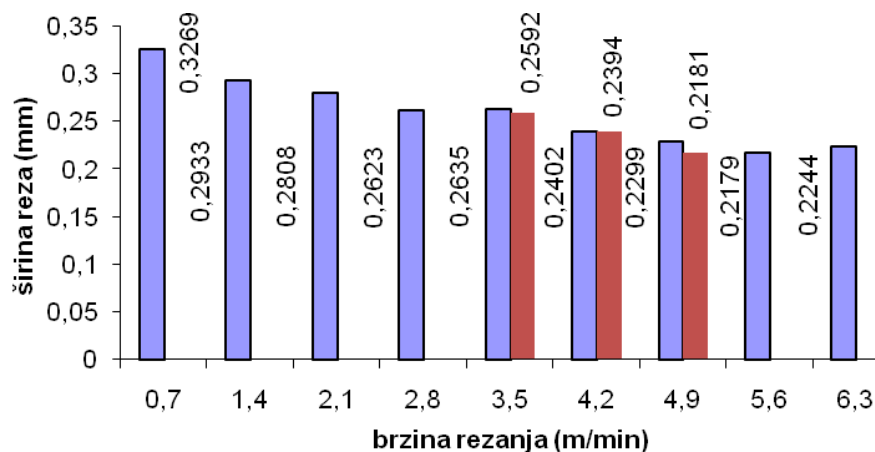
Slika 2.22 Prikaz laserskog ispitnog uzorka i alatnog mikroskopa za mjerenje širine reza

Tablica 2.12 Dobivene vrijednosti širine reza laserskih uzoraka

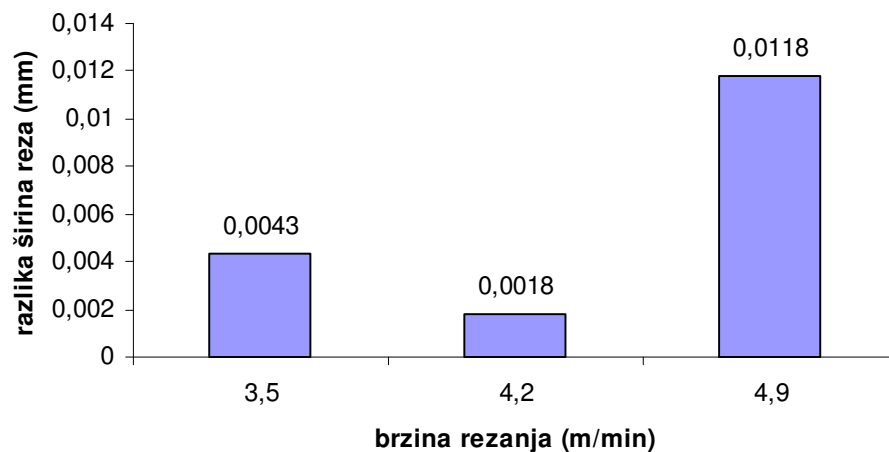
(* - pojava srha na donjoj površini reza)

Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Gornja širina reza (mm)	Donja širina reza (mm)	Razlika širina reza (mm)
1.	0,7	0,3269	*	-
2.	1,4	0,2933	*	-
3.	2,1	0,2808	*	-
4.	2,8	0,2623	*	-
5.	3,5	0,2635	0,2592	0,0043
6.	4,2	0,2412	0,2394	0,0018
7.	4,9	0,2299	0,2181	0,0118
8.	5,6	0,2179	*	-
9.	6,3	0,2244	*	-

Izmjerene vrijednosti širine reza poklapaju se i s fizikalnim očekivanjima ovog svojstva kvalitete reza. Iz rezultata je vidljivo da se povećanjem brzine rezanja dobije manja širina reza. Ovaj put kao optimalna brzina pokazala vrijednost od 3,5 i 4,2 m/min, dok se kod manjih i većih brzina od spomenutih javlja srh, nastao kao rezultat nepotpunog ispuhivanja taline. Na slikama 2.23 i 2.24 prikazana je ovisnost širine reza o brzini rezanja.



Slika 2.23 Prikaz ovisnosti širina reza o brzini rezanja

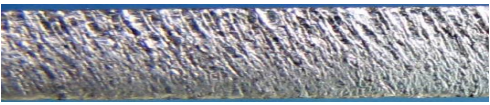
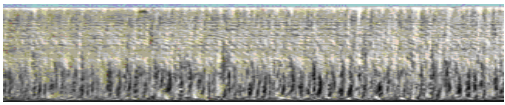


Slika 2.24 Prikaz razlika širina reza u ovisnosti o brzini rezanja

2.5 Usporedba izgleda i kvalitete rezova plazmom i laserom za optimalne parametre

Nakon svih izvršenih ispitivanja, u *tablici 2.13* prikazana je usporedba kvalitete rezanja aluminija plazmom i laserom, i to uzoraka koji su izrezani s najoptimalnijim parametrima pojedinog postupka rezanja.

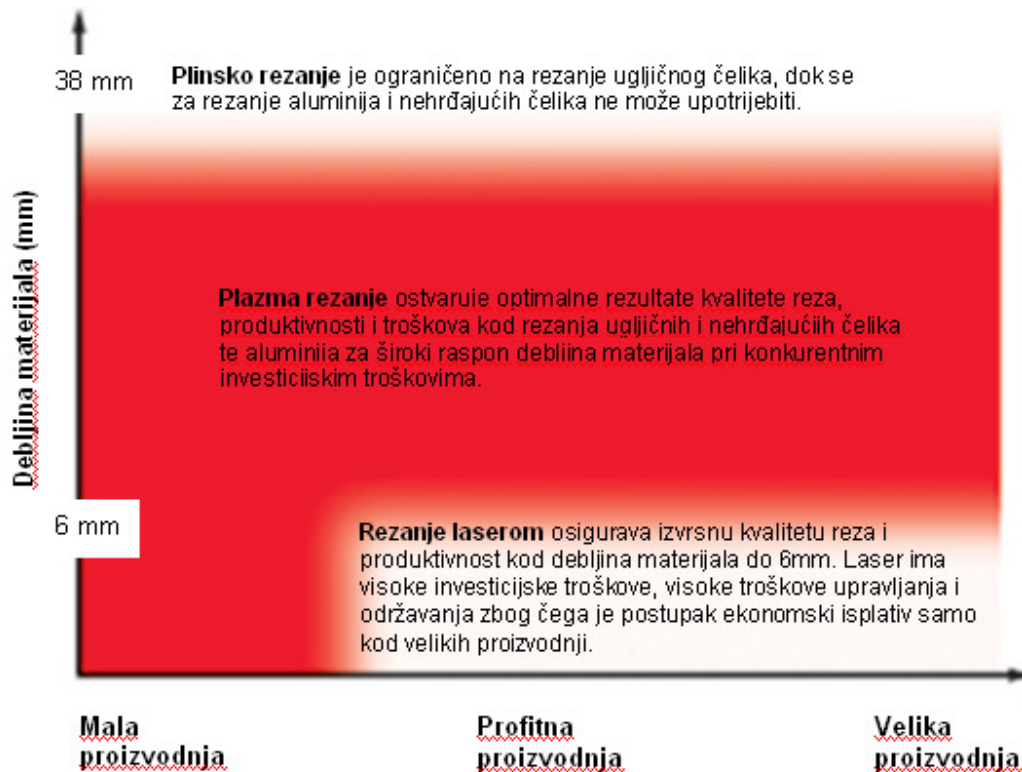
Tablica 2.13 Usporedba kvalitete reza plazme i lasera

	Plazma	Laser
		
v (m/min)	3,5	3,5
Hrapavost površine (μm)		
Ra	6,707	1,443
Ry	60,325	9,897
Rz	40,195	8,307
Rq	8,73	1,803
Tolerancija okomitosti ili kutnosti (mm)		
u	0,1830	0,0144
Širina reza (mm)		
Gornja	1,1405	0,2635
Donja	1,1307	0,2592

Iz dobivenih rezultata eksperimentalnog rada vidljivo je da su uzorci s najboljom kvalitetom rezanja, izrezani istom brzinom rezanja i plazmom i laserom. To nam govori da u slučaju rezanja tankih aluminijskih limova plazmom i laserom, nema razlike u odabiru optimalne brzine rezanja. Isto tako iz samih izmjerenih rezultata pojedinih značajki kvalitete reza vidi se da rezanje laserom osigurava izvrsnu kvalitetu reza kod rezanja limova manjih debljina. To je potvrđeno i klasifikacijom u klase kvalitete rezanja, gdje su rezovi laserom pripali prvoj klasi hrapavosti i tolerancije okomitosti ili kutnosti. To je jako bitno jer s postizanjem izvrsne kvalitete reza, nema potrebe za naknadnom obradom radnog komada. Međutim, i uzorci izrezani plazmom daju jako dobru kvalitetu reza. Uzorci izrezani plazmom na kojima nije bilo pojave greški (najčešće srh), su pripali drugoj klasi hrapavosti površine i tolerancije okomitosti i kutnosti. Najveće razlike u kvaliteti reza između plazme i lasera su u hrapavosti površine i širini reza. Tu se vidi prednost lasera, koji daje puno manju širinu reza i manju valovitost površine reza, što je jako bitno kod rezanja na tražene dimenzije. Na kraju usporedbe, treba kazati da je razlika u kvaliteti reza za optimalne brzine rezanja između plazme i lasera značajna te da se samo rezanjem laserom može postići prva klasa kvalitete reza.

2.6. Usporedba cijene i kvalitete rezanja

Usporedna analiza plazma, plinskog i laserskog rezanja u odnosu na produktivnost i debljinu materijala prikazana je *slikom 2.25* prema kojemu plazma rezanje ostvaruje kombinirana optimalna svojstva kvalitete reza, produktivnosti i troškova rezanja kod debljine materijala od 6 do 38 mm i u tom području debljina osigurava profitnu proizvodnju.



Slika 2.25 Dijagram analize plazma, plinskog i laserskog rezanja s obzirom na produktivnost i debljinu materijala [14]

Prema analizi (*tablica 2.14*) koju je provela tvrtka Kjellberg, može se očitati da je za debljine materijala 5 – 25 mm plazma rezanje najpovoljniji postupak rezanja u odnosu na kvalitetu reza, preciznost i toleranciju rezanja te produktivnost. Kod većih debljina materijala od 25 mm, za rezanje ugljičnog čelika, plinsko rezanje ostvaruje približno jednake brzine plazma postupka rezanja i postaje ekonomičniji postupak za rezanje. Kao što je već navedeno rezanje laserom daje izvrsnu kvalitetu reza i produktivnost kod debljina materijala do 6 mm. No, laser zbog svojih velikih

investicijskih, kao i velikih troškova upravljanja i održavanje je samo isplativ kod velikih proizvodnji.

Tablica 2.14 Ocjena tehnologije rezanja u odnosu na kvalitetu, produktivnost i efikasnost rezanja [15]

Materijal	Tolerancija	Plinsko rezanje	Rezanje laserom	Rezanje vodenim mlazom	Plazma rezanje
Ugljični čelik < 5 mm	do ± 0.5 mm	3	2	4	1
Ugljični čelik < 5 mm	do ± 0.1 mm	ne	1	2	2
Ugljični čelik 5-20 mm	do ± 0.5 mm	2	3	4	1
Ugljični čelik 5-15 mm	do ± 0.2 mm	2	1	3	1
Ugljični čelik 15-25 mm	do ± 0.5 mm	2	3	3	1
Ugljični čelik 25-45 mm		1	ne	3	1 (O ₂)
Ugljični čelik > 45 mm		1	ne	2	2
Visokolegirani čelik		ne	da	da	da
Aluminij		ne	(da)	da	da
Polimer		ne	da	da	ne

(1 = najbolja tehnologija, 4 = najnepovoljnija tehnologija)

Laser dobija veliku brzinu rezanja od egzotermne reakcije kada se kao dodatni plin koristi kisik, npr. pri rezanju ugljičnih čelika, ali kod aluminija to nije slučaj. Da bi se aluminij uspješno rezao kao rezni plin se koristi dušik. Zbog korištenja velike količine dušika, i neostvarivanja velikih energija od egzotermnih reakcija, brzine rezanja su puno manje te se samim time troškovi rezanja znatno povećavaju. Ako u industrijskoj aplikaciji nema potrebe za velikom kvalitetom ruba reza i jako uskim tolerancijama, plazma rezanje aluminija daje velike uštede u samoj tehnologiji rezanja.

3. Zaključak

Laser i plazma su pogodni postupci za rezanje tankih aluminijskih limova. Za rezanje aluminijskog lima debljine 3 mm koristila se strojna plazma i CO₂ laser. Rezanje je provedeno u slijedećim intervalima brzina: od 1 m/min do 5 m/min (s korakom 0,5 m/min) kod plazme te od 0,7 m/min do 6,3 m/min (s korakom 0,7 m/min) kod lasera. Dobiven je utjecaj brzine rezanja na značajke kvalitete rezanja: hrapavost površine, tolerancija okomitosti ili kutnosti i širina reza.

Hrapavost površine je ispitivana na uzorcima bez pojave srha i grube površine reza. Raspon tih brzina rezanja je iznosio od 2,5 – 4 m/min kod plazme te od 2,8 – 4,9 m/min kod lasera. Mjerene su veličine Ra, Ry, Rz i Rq. Dobiveni su uzorci dobre klase hrapavosti. Svi ispitani uzorci izrezani laserom zadovoljavaju zahtjeve i vrijednosti prve klase hrapavosti, dok uzorci izrezani plazmom spadaju u drugu klasu hrapavosti, osim uzorka 4 (brzina rezanja 2,5 m/min) koji spada u treću klasu kvalitete hrapavosti. Najmanja hrapavost površine Rz dobivena je s optimalnom brzinom rezanja 3,5 m/min, koja kod plazme iznosi 40,195 µm, a kod lasera iznosi 8,307 µm.

Tolerancija okomitosti ili kutnosti je ispitivana na uzorcima bez pojave srha na donjoj površini reza. Raspon tih brzina rezanja je iznosio od 1,5 – 4,5 m/min kod plazme te od 2,8 – 4,9 m/min kod lasera. Svi uzorci izrezani plazmom, osim uzorka 7 (brzina rezanja 4 m/min) ubrajaju se u drugu klasu tolerancije okomitosti ili kutnosti. Uzorak 7 ima lošije vrijednosti tolerancija, te je klasificiran u treću klasu. Uzorci izrezani laserom pripadaju prvoj klasi tolerancije okomitosti ili kutnosti. Kod plazme, najmanju vrijednost tolerancije okomitosti ili kutnosti ima uzorak 4 (2,5 m/min) iznosa 0,1801 mm, dok se kod lasera najmanja vrijednost dobije s optimalnom brzinom rezanja (3,5 m/min) iznosa 0,0144 mm. Dobivene rezultate za ovu toleranciju treba uzeti s rezervom, jer je se zbog nedostatka uređaja potrebnog za mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti koristio alatni mikroskop.

Širina reza je treća ispitivana značajka kvalitete reza. Gornja širina reza ispitivana je na svim uzorcima, dok se donja širina reza mjerila samo na uzorcima bez pojave srha na donjoj površini reza. Raspon brzina rezanja za mjerenje donje širine reza je iznosio od 2,5 – 4 m/min kod plazme te od 3,5 – 4,9 m/min kod lasera. Brzina rezanja i širina reza odnose se kao obrnuto proporcionalne veličine. Razlika između širina reza dobivenih plazmom i laserom je velika. S najmanjom brzinom rezanja plazmom 1 m/min dobivena je širina reza 1,8319 mm, koja je povećanjem brzine padala, sve do iznosa 0,8941 mm pri brzini rezanja od 5 m/min. Laserom je dobivena puno manja širina reza, koja iznosi 0,3269 mm pri brzini rezanja 0,7 m/min, a pri brzini rezanja 6,3 m/min iznosi 0,2244 mm. Dobiveni rezultati razlika gornjih i donjih širina reza pokazuju da plazma ima veće odstupanje

od pravog kuta od lasera, te samim time uzorci izrezani plazmom mogu ponekad zahtijevati naknadnu obradu.

Na kraju, dobiveni rezultati značajki kvalitete reza pokazali su da rezovi plazmom i laserom ne pripadaju istoj klasi kvalitete reza. Rezanjem laserom postigla se prva klasa hrapavosti i tolerancije okomitosti ili kutnosti, dok se rezanjem plazmom postigla najviše druga klasa kvalitete reza. Predmet daljnjih istraživanja moglo bi biti određivanje kvalitete reza plazme s dvostrukim rotirajućim plinom, koja bi prema literaturnim podacima trebala biti još bliže laserskoj kvaliteti.

4. Literatura

- [1] http://www.linde-gas.co.uk/international/web/lg/uk/like1guk.nsf/DocByAlias/ind_mv_licht5
- [2] H. Simler, V. Krink, F. Laurisch; Suvremena tehnologija rezanja plazmom, Zavarivanje 48 (2005), 1/2, 5 – 12.
- [3] M. Gojić; Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [4] Linde gas; Facts about plasma technology, Plasma cutting.
- [5] http://www.hypertherm.com/technology/plasma_history.htm
- [6] <http://archive.metalformingmagazine.com/1998/05/plasma/plasma.htm>
- [7] <http://www.millerwelds.com/education/articles/articles55.html>
- [8] S. Kralj, Š. Andrić; Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Zagreb, 1992.
- [9] F. R. Aussenegg; The laser principle – how laser radiation is generated, Zbornik radova, 1995.
- [10] B. Bauer; Predavanja: Rezanje laserom – EWE tečaj.
- [11] HRN EN ISO 9013:2002.
- [12] <http://www.spt.se>
- [13] <http://pro-laser.hr>
- [14] http://www.hypertherm.com/languages/english/why_plasma.php
- [15] <http://www.kjellberg.cz/plasma/eng/ewasplasma.htm>